

Beschreibung

Verfahren zur gesteuerten Einprägung eines Ständerstrom- und
eines Drehmoment-Sollwertes für eine stromrichter-
5 Drehfeldmaschine

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur gesteuerten
Einprägung eines Ständerstrom-Sollwertes und einen Drehmo-
ment-Sollwertes für eine stromrichter-
10 geschneide.maschine.

Zur Speisung von Drehfeldmaschinen, deren Moment sich in ei-
nem weiten Drehzahlbereich hochdynamisch auf gewünschte Werte
einstellen lässt, werden meist Pulswechselrichter mit kon-
stanter Eingangsspannung eingesetzt, häufig in Verbindung mit
15 einem feldorientierten Regelungsverfahren. Solch ein An-
triebssystem genügt normalerweise auch den höchsten techni-
schen Ansprüchen an die Regelgüte. Unter der Voraussetzung
von in jeder gewünschten Weise einprägbaren Klemmenströmen
20 können im Prinzip der Magnetfluss und das Drehmoment einer
Drehfeldmaschine ständig auf gewünschte Werte eingestellt
werden, allerdings nur dann, wenn alle elektromagnetischen
Systemparameter eines hinreichend genauen Beschreibungs-
modells der Maschine bekannt sind. Mit Hilfe eines Signalverar-
25 beitungssystems können dann - ausgehend von den Messgrößen
der Klemmenströme und der Drehzahl - in Abhängigkeit von ei-
ner Sollgröße, z.B. für das Drehmoment, fortlaufend die zuge-
hörigen Klemmenspannungen bestimmt werden. Bei besonders ho-
hen dynamischen Anforderungen an die Regelung der Drehfeldma-
30 schine muss die Pulsfrequenz ebenfalls groß gemacht werden.
Dies wirkt sich ungünstig auf den Wirkungsgrad und die Kosten
des Wechselrichters aus.

Traktionsstromrichter für Schienenfahrzeuge erlauben wegen
35 der hohen Leistungsdichte und Effizienzanforderungen keine
hohe Schaltfrequenz. Beispielsweise liegt die Schaltfrequenz
im Spannungsstellbereich nur im Bereich von 300Hz - 800 Hz

2

bei Lokomotiven, Triebzügen und schweren Nahverkehrszügen und 800Hz - 2kHz im leichten Nahverkehr. Daneben muss die verfügbare Zwischenkreisspannung optimal ausgenutzt werden, d.h., aus regelungstechnischen Gründen darf keine Spannungsreserve gefordert werden. Zur Vermeidung von unzulässigen Netzrückwirkungen muss das stationäre Oberschwingungsspektrum definiert und beeinflussbar sein. Dies erfordert zusammen mit der beschränkten Schaltfrequenz und maximaler Aussteuerbarkeit synchrone Taktverfahren für den Pulswechselrichter.

Die dynamischen Anforderungen an Traktionsumrichter sind ebenfalls hoch. Sowohl das Störverhalten, beispielsweise bei Fahrleitungsspannungssprüngen, als auch das Führungsverhalten, beispielsweise die gewünschte hohe Drehmomentdynamik, für die Beherrschung von Gleit- und Schleudervorgängen, sowie von mechanischen Antriebsschwingungen, muss gegenüber normalen stationären Antrieben hochdynamisch sein.

Darüber hinaus muss die projektierte maximale Strombelastung des Umrichters genau eingehalten werden, um eine Überdimensionierung des Leistungsteils zu vermeiden. Auch bei Stör- und Führungsgrößenänderungen muss der vorgegebene Strom durch das Regelverfahren eingeprägt werden können.

Deshalb ist ein Regelverfahren mit Einprägung des Ständerstromes erforderlich. Dieses ermöglicht zugleich optimales stationäres und dynamisches Verhalten für die Vorgabe des Drehmomentes.

Eine genaue und hochdynamische Regelung des Ständerstroms direkt scheiterte bisher an den durch die Taktung verursachten erheblichen Oberschwingungen und den für Oberschwingungen stark nichtlinearen Maschinenparametern (Streuinduktivität und Hauptinduktivität).

Aus der Veröffentlichung "Die stromrichterernahe Antriebsregelung des Steuergerätes für Bahnautomatisierungssysteme SIBAS

32", abgedruckt in der DE-Zeitschrift "eb - Elektrische Bahnen", Band 90 (1992), Heft 11, Seiten 344 bis 350, ist eine stromrichterernahe Antriebsregelung für Asynchronmaschinen nach dem Verfahren der Feldorientierung mit den wesentlichen Funktionen Messwerterfassung, Flussmodell, Regelstruktur sowie
5 Steuersatz bekannt.

Für die Antriebsregelung nach dem bewährten Verfahren der Feldorientierung ist die Erfassung von analogen Messgrößen
10 erforderlich. Gemessen werden zwei Maschinenströme und die Eingangsspannung des Pulswechselrichters auch Zwischenkreis-
spannung genannt. In einer Variante werden auch zwei Leiter-
spannungen gemessen. Als weitere Messgröße wird die Motor-
drehzahl erfasst. Speist ein Wechselrichter zwei parallel ge-
15 schaltete Fahrmotoren, so werden beide Motordrehzahlen er-
fasst und für die Regelung der arithmetische Mittelwert be-
nutzt.

Grundlage der feldorientierten Regelung ist die Kenntnis des
20 Betrages und der Winkellage des Rotorflusses. Da diese Größen
nicht direkt messbar sind, werden im allgemeinen Rechenmodel-
le eingesetzt, welche die innere Struktur der Asynchronma-
schine nachbilden. Zur Bestimmung des Rotorflusses aus den
gemessenen Istwerten Spannung, Strom- und Drehzahl dient ein
25 Flussmodell. Es besteht aus zwei bekannten Teilmodellen der
Asynchronmaschine nämlich dem Spannungsmodell und dem Strom-
modell. Bei kleinen Drehzahlen überwiegt der Einfluss des
Strommodells, wogegen bei größeren der des Spannungsmodells
überwiegt. Die verwendete Struktur vereinigt damit die Vor-
30 teile beider Teilmodelle und kann als ein vom Strommodell ge-
führtes Spannungsmodell aufgefasst werden. Das Strommodell
enthält den Parameter Rotorzeitkonstante. Während des Betrie-
bes ändert sich der Rotorwiderstand der Maschine stark mit
der Rotortemperatur. Die Kenntnisse des aktuellen Rotorwider-
35 standes ist demnach für ein genaues Arbeiten des Strommodells
erforderlich.

Die zentrale Aufgabe des Signalprozessorsystems liegt in der Ansteuerung des Pulswechselrichters, so dass der Fahrmotor den geforderten Sollwerten folgt. Die beiden Leiterspannungen sowie die drei Maschinenströme werden in Koordinatenwandlern
5 in zwei orthogonale Komponenten umgerechnet. Mit dem Flusswinkel werden nun die beiden orthogonalen Stromkomponenten vom statorfesten Koordinatensystem in ein mit dem Rotorflussraumzeiger umlaufende System transformiert, also die Feldorientierung der Stromkomponenten vorgenommen. Nach einer Filte-
10 rung liegen dann die Istwerte der feldbildenden und der momentenbildenden Stromkomponente vor. In einem stationären Betriebspunkt sind diese Stromkomponenten Gleichgrößen.

Um nun aus den Führungsgrößen Sollfluss und Sollmoment die
15 Regelungsausgangsgrößen zu ermitteln, wird üblicherweise die inverse Struktur der Asynchronmaschine in einer sogenannten Entkopplungsschaltung nachgebildet. Sie berechnet aus dem Flusssollwert, dem der Magnetisierungskennlinien entnommenen Magnetisierungsstromsollwert, dem Wirkstromsollwert und der
20 Winkelgeschwindigkeit des Rotorflusses die benötigten Spannungskomponenten. Zur Stabilisierung werden zwei Stromregler für die feldbildende und die momentenbildende Stromkomponente zu den Ausgängen der Entkopplung addiert.

25 Die Anpassung der Regelung an die aktuelle Zwischenkreisspannung wird im Steuersatz vorgenommen. Aus der Sollspannung und dem Istwert der Zwischenkreisspannung wird der Aussteuergrad für den Pulsbreitenmodulator berechnet. Es ist die Aufgabe des Steuersatzes durch abwechselndes Umschalten der drei
30 Wechselrichterzweigpaare am Motor die geforderte, in Frequenz und Amplitude einstellbare Spannungsgrundschwingung zu erzeugen.

Die Schaltzeiten werden je nach Betriebszustand nach zwei un-
35 terschiedlichen Modulationsverfahren berechnet. Bei kleinen Frequenzen und Spannungen im Bereich des Anfahrens und kleiner Geschwindigkeit wird asynchrone sinusförmige Modulation

- verwendet. Da hier viele Umschaltungen auf eine Periode der Grundfrequenz kommen, müssen die Schaltzeiger und die dazugehörigen Schaltwinkel on-line vom Prozessor bestimmt werden. Erreicht das Verhältnis von Schalt- zu Grundfrequenz, die sogenannte Pulszahl, einen Wert von etwa 10 bis 8, muss der Wechselrichter synchron zur Grundfrequenz getaktet werden. Mit steigender Grundfrequenz muss infolge der begrenzten Schaltfrequenz des Wechselrichters die Pulszahl stufenweise verkleinert werden. Hier werden off-line optimierte Pulsmuster verwendet. Wichtigstes Optimierungskriterium ist der Effektivwert des Oberschwingungsstromes, da dieser hauptsächlich die zusätzlichen Verluste im Motor durch die Umrichter-speisung verursacht.
- Als zweiter Schritt nach der Optimierung ist deshalb die Pulsmusterauswahl durchzuführen. Dabei wird für die Auswahl des geeigneten Pulssystems für den Prozessor ein Kennfeld erstellt, in dem für alle möglichen diskreten Werte von Grundfrequenz und Aussteuergrad das am besten geeignete Pulsmuster eingetragen ist, das die Randbedingung maximale Schaltfrequenz und Einhaltung der minimalen Pulsbreite sowie des maximalen Stromspitzenwertes erfüllt. Die Pulsmusterauswahlebene sowie die für jedes Pulssystem und jeden Aussteuergrad off-line optimierten Pulswinkel sind in der Signalprozessoreinheit in Tabellenform gespeichert. Im Programmmodulsteuersatz werden zuerst aus der Auswahlebene die Modulationsart und das Pulssystem bestimmt, das zudem von der Regelung geforderten Betriebspunkt gehört. Im Bereich der optimierten Muster sind aus den für den betreffenden Aussteuergrad gespeicherten Schaltwinkeln die Schaltzeiten in Abhängigkeit der momentanen Statorfrequenz zu berechnen. Bei Pulssystemwechseln müssen die Zeitpunkte so gewählt werden, dass keine Ausgleichsvorgänge oder unerwünschten Stromspitzen auftreten.
- Mit diesem sogenannten Spannungssteuersatz kann die Stellgröße Spannung nur als Grundschwingung in Betrag und Winkel vorgegeben werden, die Momentanwerte der übrigen elektrischen

Größen sind dann durch das Pulsmuster vorgegeben und nicht mehr on-line zu beeinflussen. Bei zu hoher Dynamik der Stellgröße treten Ausgleichsvorgänge auf, die zu starken Drehmomentschwingungen führen.

5

In der Veröffentlichung "Direkte Selbstregelung (DSR) für hochdynamische Drehfeldantriebe mit Stromrichterspeisung" abgedruckt in der DE-Zeitschrift "etzArchiv", Band 7 (1985), Heft 7, Seiten 211 bis 218, wird eine direkte Selbstregelung einer stromrichtergespeisten Asynchronmaschine beschrieben, die ohne Pulsbreitenmodulation arbeitet, wenig parameterempfindlich ist und außerdem sehr gute dynamische Eigenschaften aufweist. Wenn eine Drehfeldmaschine über einen dreisträngigen Wechselrichter bei konstanter Eingangsspannung gespeist wird, kann der Raumzeiger der Ständerspannung nur sieben diskrete Werte annehmen. Vernachlässigt man die im Feldschwäcbereich in der Regel gegenüber der Ständerspannung kleine Spannung, die an den Kupferwiderständen der Ständerwicklungen abfällt, so bestimmt der jeweilige Augenblickswert des Spannungsraumzeigers eindeutig die Änderung der augenblicklichen Lage des Raumzeigers für den Gesamtfluss hinsichtlich Geschwindigkeit und Richtung. Bei stationärer Grundfrequenztaktung durchläuft die Spitze des Flussraumzeigers deshalb ein gleichseitiges Sechseck mit konstanter Bahngeschwindigkeit und geringfügig pulsierender Winkelgeschwindigkeit.

Bei Grundfrequenztaktung besteht die einzige Möglichkeit zur Beeinflussung des Drehmoments der Asynchronmaschine darin, die Zeitabstände zwischen den Umschaltungen des Spannungsraumzeigers zu steuern. Vernachlässigt man die stromproportionalen Spannungen am Kupferwiderstand der Ständerwicklungen, kann bei einem dreisträngigen Wechselrichter mit konstanter Eingangsgleichspannung die Bahngeschwindigkeit sehr einfach auf den Wert Null verringert werden, nämlich durch Einschaltung des siebten Maschinenspannungsraumzeigers, dessen Betrag den Wert Null hat. Über ein Pulsspiel bestehend aus einem ersten Teilintervall mit unverminderter Bahngeschwindigkeit

des Flussraumzeigers und einem zweiten Intervall mit gegenüber den Ständerachsen stillstehenden Flussraumzeigers, kann durch die Wahl der Dauer beider Teilintervalle bekanntlich jeder beliebige Zwischenwert der für das Pulsspiel gemittel-

5 ten Bahngeschwindigkeit eingestellt werden.

Die Signalverarbeitung für die direkte Flussselbstregelung weist einen Fluss- und einen Momentenvergleich auf. Aus den gemessenen Spannungswerten vermindert um einen Spannungsab-

10 fall an den Kupferwiderständen der Ständerwicklungen der Asynchronmaschine wird mittels eines Integrators orthogonale Komponenten des Ständerflusses generiert, die in Flussgrößen einer jeden Ständerwicklungsachse der Asynchronmaschine gewandelt werden. Diese Flussgrößen werden jeweils mit einer

15 Flussführungsgröße verglichen, die von einer Drehmomentregelung abgeleitet werden kann. Im Grunddrehzahlbereich ergibt sich dann eine sehr einfache Regelung nach folgender Vorschrift:

20 Übersteigt der Istwert des Moments den Sollwert um mehr als eine zugelassene Toleranz, so ist anstelle des durch die Flussselbstregelung aus den sechs äußeren Raumzeigerwerten der Maschinenspannung bestimmten aktuellen Raumzeigerwerts der siebte Raumzeigerwert mit dem Betrag Null solange einzu-

25 schalten, bis der Istwert des Moments den Sollwert um mehr als die zugelassene Toleranz unterschreitet. Danach bestimmt wieder die Flussselbstregelung den Schaltzustand des Wechselrichters. Der siebte Spannungsraumzeigerwert mit dem Betrag Null kann bekanntlich durch zwei verschiedene Schaltzustände

30 bewirkt werden. Durch entsprechende Auswahlkriterien lassen sich Nebenbedingungen erfüllen, z.B. minimale Schalthäufigkeit, Gewährleistung von Schaltzustand-Minimalzeiten.

Auf diese beschriebene Weise stellt sich die über ein Puls-

35 spiel gemittelte Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Anteils der resultierenden Flussverkettung selbständig auf den zur Erzeugung des gewünschten Drehmoments erforderlichen Wert

ein, und zwar ohne jede Information über die Wellendrehzahl und über aktuelle Werte von Induktivitäten, Rotorwiderstand sowie über andere Größen und Parametern, die bei einem feldorientierten Regelungsverfahren bekannt sein müssen. Die in
5 der Regel immer vorhandenen langsamen und schnellen Schwankungen der Eingangsgleichspannung des Wechselrichters werden durch die direkte Selbstregelung automatisch berücksichtigt und bleiben so ohne Auswirkung auf das in einem vorbestimmten Toleranzband geführte Drehmoment.

10

Diese direkte Selbstregelung ist für einen Traktionsantrieb geeignet und liefert ein optimales dynamisches Verhalten, allerdings kein reproduzierbares stationäres Verhalten. Außerdem erlaubt diese direkte Selbstregelung kein zu kleines Ver-
15 hältnis von Schalt- zu Grundfrequenz.

20

In der Veröffentlichung "Direkte Drehmomentregelung von Drehstromantrieben", abgedruckt in der DE-Zeitschrift "ABB Technik", Nr. 3, 1995, Seiten 19 bis 24, wird eine neuentwickelte direkte Drehmomentregelung vorgestellt. Diese direkte Drehmomentregelung, auch als Direct Torque Control (DTC) bezeichnet, basiert auf den Theorien der feldorientierten Regelung von Asynchronmaschinen und der direkten Selbstregelung. Bei der direkten Drehmomentregelung sind Motor und Wechselrichter
25 weitgehend integriert. Alle Schaltvorgänge des Wechselrichters sind vom elektromagnetischen Zustand des Motors abhängig. Wie bei Gleichstrommaschinen ermöglicht die DTC eine getrennte Regelung von Fluss- und Drehmoment. Ein Pulsweitenmodulator zwischen Motor und Wechselrichtersteuerung wird nicht
30 benötigt.

35

Kerneinheiten des DTC-Systems sind die Baueinheiten zur Hystereseregulation von Drehmoment und magnetischen Fluss sowie die Logikeinheit zur Schaltoptimierung. Ein anderer wichtiger Bestandteil des Systems ist das genaue Motormodell. Das Motormodell erzeugt durch Messungen zweier Motorströme und der Spannung im Gleichstrom-Zwischenkreis Istwert-Signale von

Drehmoment, Ständerfluss, Frequenz und Wellendrehzahl. Die Sollwerte für Drehmoment und Fluss werden mit den Istwerten verglichen, und durch Zweipunktregelung der Hysterese werden die Stellsignale erzeugt. Die Logik zur Schaltoptimierung ermittelt anhand der Sollwerte für Drehmoment und Fluss den besten Spannungsvektor. Die Regelung des Ständerflusses erfolgt über die Ausgangsspannung des Wechselrichters. Bei der DTC werden Ständerfluss und Drehmoment innerhalb der Hysteresegrenze gehalten, also innerhalb des gewählten Toleranzbandes. Die Zustandssollwerte werden nur dann geändert, wenn die Istwerte von Drehmoment und Ständerfluss mehr als um die erlaubte Hysterese von ihren Sollwerten abweichen. Wenn der rotierende Ständerflussvektor die obere oder untere Hysteresegrenze erreicht, wird ein geeigneter Spannungsvektor dazu benutzt, die Richtung des Ständerflusses zu ändern und ihn damit innerhalb des Hysteresebandes zu halten. Das erforderliche Drehmoment erzielt man durch die Regelung des Ständerflussvektors.

Auch diese direkte Drehmomentregelung liefert ein optimales dynamisches Verhalten wie die direkte Selbstregelung. Jedoch ist das stationäre Verhalten nicht reproduzierbar und diese direkte Drehmomentregelung erlaubt auch kein zu kleines Verhältnis von Schalt- zu Grundfrequenz.

In der Veröffentlichung "Direkte Selbstregelung, ein neuartiges Regelverfahren für Traktionsantriebe im Ersteinsatz bei dieselelektrischen Lokomotiven", abgedruckt in der DE-Zeitschrift "eb - Elektrische Bahnen", Band 89 (1991), Heft 3, Seiten 79 bis 87, ist eine Realisierung der direkten Selbstregelung (DSR) beschrieben.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur gesteuerten Einprägung eines Ständerstrom- und eines Drehmoment-Sollwertes anzugeben, das die Nachteile der bekannten Verfahren vermeidet, sowie die Erweiterung des Einsatzbereiches auf Synchronmaschinen erlaubt.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

Durch dieses erfindungsgemäße Verfahren wird die feldorientierte Regelung mit einem Spannungszeitflächen-Steuersatz für off-line optimierte Pulsmuster kombiniert. D.h., als Stellgröße wird keine Ständerspannung mehr vorgegeben, sondern deren Integral, also Spannungszeitflächen. Da diese Spannungszeitflächen die Dimension eines Flusses haben, wird diese Spannungszeitfläche anschaulicher als Klemmenfluss bezeichnet. Somit wird aus einem Spannungssteuersatz ein Spannungszeitflächen-Steuersatz, mit dem eine ausgewählte Flussbahnkurve stationär und dynamisch genau nachgefahren werden kann, um damit die Lage eines ermittelten Klemmenflusses zum Rotorfluss einer Drehfeldmaschine sowohl nach Betrag als auch nach Winkel unmittelbar mit jeder möglichen Schalthandlung einzustellen. Im stationären Zustand ist somit aufgrund der stationär exakten Vorsteuerung mit dem Klemmenfluss auch der Ständerfluss und damit das Drehmoment eingeprägt, das aus der Lage von Ständerfluss zum Rotorfluss bestimmt ist. Außerdem wird durch diese Vorsteuerung des Klemmenflusses der Ständerstrom indirekt eingeprägt, wodurch die Nachteile einer direkten Stromregelung vermieden werden.

Da bei synchroner Taktung die zeitkontinuierliche Differentiation des Flusses zur Spannung zur Erreichung einer stationär und dynamisch richtigen Vorsteuerung nicht möglich ist, wird aufgrund der Erkenntnis dieser Erfindung diese in den zeitdiskreten, pulssynchronen Steuersatz verlagert. Dadurch ist die Eingangsgröße des Steuersatzes dann nicht mehr die Spannung, sondern ihr Integral über der Zeit, was einer Spannungszeitfläche entspricht, die in dem jeweiligen diskreten Abtastintervall vom Steuersatz realisiert werden soll. Die Verschiebung der Differentiation des Klemmenflusses in den Steuersatz bedingt weitergehende Änderungen in der Behandlung und Ausgabe der optimierten Pulsmuster im Steuersatz.

Bei einem vorteilhaften Verfahren wird der Klemmenfluss über einen Umweg über die Berechnung der stationären Ständerspannung ermittelt. Dadurch erhält man gleichzeitig einen Aussteuergrad, der bei der Auswahl eines Pulsmusters verwendet werden kann. Im Feldschwäcbereich muss der Aussteuergrad begrenzt werden, die durch den Umweg über die Ständerspannung nun vorgenommen werden kann.

Bei einem weiteren vorteilhaften Verfahren wird ein Istwert des Klemmenflusses bestimmt, der bei der dynamischen Führung eines ermittelten Klemmenflusses auf einer ausgewählten Flussbandkurve verwendet wird. Dadurch werden Abweichungen, die Ausgleichsvorgänge zur Folge haben können, weitgehend kompensiert. Damit wird die dynamische Abweichung vom Ständerfluss auf den Klemmfluss verschoben, wodurch ein Drehmoment-Sollwert auch dynamisch eingeprägt werden kann. Mit der Einprägung eines Drehmoment-Sollwertes ist die Lage des Ständerflusses zum Rotorfluss exakt eingeprägt, wodurch auch der Ständerstrom bestimmt ist. Somit wird ein Sollwert eines Ständerstromes ebenfalls dynamisch indirekt eingeprägt.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Zeichnung Bezug genommen, in der das erfindungsgemäße Verfahren schematisch veranschaulicht ist.

25

FIG 1 zeigt eine Struktur einer gesamten Antriebsregelung einer Drehfeldmaschine ohne Drehzahlgeber, in der

FIG 2 ist ein Zeigerdiagramm einer Asynchronmaschine im rotorflussfesten Koordinatensystem veranschaulicht, die

FIG 3 zeigt eine vereinfacht dargestellte Regelstrecke einer Asynchronmaschine, die

FIG 4 zeigt eine Spannungsvorsteuerung einer Asynchronmaschine rotorflussorientiert, in der

FIG 5 ist eine Struktur der Vorsteuerung für einen Spannungssteuersatz dargestellt, wogegen in der

FIG 6 eine Struktur der Vorsteuerung für einen Spannungszeitflächensteuersatz veranschaulicht ist, die

12

- FIG 7 zeigt die möglichen Ausgangsspannungen eines Pulswechselrichters im statorfesten Raumzeigerkoordinatensystem, in der
- FIG 8 ist ein Klemmenflussverlauf in einem Sektor mit Flussbetrags- und Winkelschwellen dargestellt, die
- 5 FIG 9 zeigt die Realisierung eines vorteilhaften Verfahrens nach der Erfindung, in der
- FIG 10 ist eine Realisierung eines Fluss- und Drehmomentreglers nach FIG 9 veranschaulicht, die
- 10 FIG 11 zeigt eine Realisierung der Vorsteuerung nach FIG 9, in der
- FIG 12 ist ein Blockschaltbild einer Einrichtung zur Berechnung eines Klemmenfluss-Istwertes näher dargestellt, die
- 15 FIG 13 zeigt die Struktur eines Spannungszeitflächen-Steuersatzes im Grunddrehzahlbereich, die
- FIG 14 veranschaulicht die Funktion einer Bahnkurvenabkürzung bei Vollblock, die
- FIG 15 veranschaulicht die Funktion einer Bahnkurvenabkürzung bei einem Flankenpulsmuster, wogegen die
- 20 FIG 16 die Lage der Nullzeiger bei dynamischer Bahnkurvenabkürzung veranschaulicht und in der
- FIG 17 ist eine Struktur eines Spannungszeitflächen-Steuersatzes im Grunddrehzahl- und Feldschwächbereich
- 25 dargestellt.

Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird das erfindungsgemäße Verfahren im folgenden am Beispiel der Asynchronmaschine dargestellt.

30

In der FIG 1 ist eine Struktur der gesamten Antriebsregelung 2 einer Drehfeldmaschine 4 ohne Drehzahlgeber dargestellt. Die Einrichtung 6, insbesondere ein Mikroprozessor, ist für die Durchführung eines wesentlichen Teils des erfindungsgemäßen Verfahrens verantwortlich. Mittels dieser Einrichtung 6

35 wird aus ermittelten Stromkomponenten $I_{sq\text{soll}}$ und $I_{sd\text{soll}}$ und einer ermittelten Ständerkreisfrequenz ω_s als Stellgröße eine

Spannungszeitfläche, die hier als Klemmenfluss Ψ_{Ksoll} bezeichnet wird, berechnet. Die drehmomentbildende Stromkomponente $I_{sq_{soll}}$ eines einzuprägenden Ständerstrom-Sollwertes I_{ssoll} wird mittels eines Drehmomentreglers 8 in Abhängigkeit eines Drehmoment-Sollwertes M_{soll} , eines ermittelten Rotorfluss-Istwertes Ψ_R und eines Drehmoment-Istwertes M berechnet. Außerdem erhält man am Frequenz-Ausgang dieses Drehmomentreglers 8 eine Rotorschleppfrequenz ω_R , die mittels eines Addierers 10 mit einer berechneten Kreisfrequenz ω , die proportional zur mechanischen Drehzahl der Drehfeldmaschine 4 ist, verknüpft. Zur Bestimmung der flussbildenden Stromkomponente $I_{sd_{soll}}$ des einzuprägenden Ständerstrom-Sollwertes I_{ssoll} ist ein Flussregler 12 vorgesehen. Deren Eingängen steht ein vorbestimmter Rotorfluss-Sollwert Ψ_{Rsoll} und ein ermittelter Rotorfluss-Istwert Ψ_R an. Diese beiden Stromkomponenten $I_{sd_{soll}}$ und $I_{sq_{soll}}$ sind Komponenten eines rotorflussfesten Koordinatensystem d, q . Der Drehmoment- und Flussregler 8 und 12 sind aus der feldorientierten Regelung hinreichend bekannt. Außerdem sind aus der feldorientierten Regelung die weiteren Einrichtungen 14, 16 und 18 bekannt. Mit 14 ist ein Motormodell, mit 16 eine Drehzahl- und Parameteradaption und mit 18 ein Betragsbildner bezeichnet. Mittels der Einrichtung 16 werden ein Drehzahlwert und Parameterwerte der Drehfeldmaschine 4, wie Ständerwiderstand R_s , Streuinduktivität L_σ und Hauptinduktivität L_h berechnet. Dazu wird einerseits ein Rotorfluss-Istwert Ψ_R und andererseits eine Ständerstrom-Differenz I_{se} , die aus einem Ständerstrom-Modellwert I_{smot} und einem Ständerstrom-Istwert I_s , der am Ausgang eines Koordinatenwandlers 20 ansteht, verwendet. Den Ständerstrom-Modellwert I_{smot} wird von der Einrichtung 14 geliefert, die einen Rotorfluss Ψ_R und einen Drehmoment-Istwert M generiert. Dazu benötigt diese Einrichtung 14 wenigstens die Parameter und den ermittelten Drehzahl-Istwert ω . Mit 22 ist ein inverses Wechselrichtermodell bezeichnet, dem der Ständerstrom-Modellwert I_{smot} zugeführt ist. Ausgangsseitig am inversen Wechselrichtermodell 22 stehen Steuersignale S_v für einen lastseitigen Stromrichter 24, insbesondere einem Pulswechselrichter, an, der die Dreh-

feldmaschine 4 speist. Als Drehfeldmaschine 4 kann eine Asynchron- oder eine Synchronmaschine verwendet werden.

In der FIG 2 ist beispielhaft ein Zeigerdiagramm einer Asynchronmaschine in rotorflussfesten Koordinatensystem d, q veranschaulicht. Dieses Zeigerdiagramm zeigt wie gewöhnlich den Ständerspannungs-Zeiger \underline{U}_s für den stationären und den dynamischen Fall. Ebenfalls ist der Ständerstrom-Zeiger \underline{I}_s mit seinen orthogonalen Stromkomponenten I_{sd} und I_{sq} dargestellt. Neu in diesen bekannten Zeigerdiagramm sind Flusszeiger $\underline{\Psi}_k$ und $\underline{\Psi}_s$ dargestellt. Der Flusszeiger $\underline{\Psi}_k$ entspricht dem um 90° gedrehten Ständerspannungs-Zeiger \underline{U}_{sstat} . Somit ist dieser Flusszeiger $\underline{\Psi}_k$ das Integral des Ständerspannungs-Zeigers \underline{U}_{sstat} und wird als Klemmenfluss-Zeiger $\underline{\Psi}_k$ bezeichnet. Dieser Klemmenfluss-Zeiger $\underline{\Psi}_k$ entspricht der vektoriellen Addition des Ständerfluss-Zeigers $\underline{\Psi}_s$ und einem zum Spannungsabfall am Ständerwiderstand R_s korrespondierenden Flusszeiger.

Eine stationär und dynamisch richtige Vorsteuerung muss die Struktur der Regelstrecke invers wiedergeben, um deren stationäres und dynamisches Verhalten zu kompensieren. In der FIG 3 ist prinzipiell die Aufteilung der Struktur einer Drehfeldmaschine, insbesondere einer Asynchronmaschine, mit den schnell veränderlichen elektrischen Größen der Ständermaschine 26 und den nur langsam änderbaren elektrischen Größen der Rotormaschine 28 dargestellt. Die Vorsteuerung und Regelung von Rotorfluss $\underline{\Psi}_R$ und Drehmoment M (bei einer permanenterregten Synchronmaschine nur Drehmoment) kann in die langsame Vorsteuerung und Regelung des Rotorflusses $\underline{\Psi}_R$ und die hochdynamische Vorsteuerung und Regelung der feld- und momentenbildenden Stromkomponenten I_{sd} und I_{sq} aufgeteilt werden. Beim erfindungsgemäßen Verfahren sind nur die Vorsteuerung und Regelung der Stromkomponenten I_{sd} und I_{sq} über die Ständermaschine 26 von Interesse. Bei einer permanenterregten Synchronmaschine ist prinzipiell nur die Ständermaschine 26 vorhanden.

In FIG 4 ist die erforderliche Struktur der Vorsteuerung der Ständermaschine 26 dargestellt. Dabei sind die Spannungskomponenten U_{sd} und U_{sq} in die stationären und dynamischen Anteile U_{sdstat} , U_{sqstat} und $U_{sd dyn}$, $U_{sq dyn}$ aufgeteilt. Da diese Struktur der Vorsteuerung für ein Fachmann selbstklärend ist, wird an dieser Stelle auf eine nähere Beschreibung dieser Struktur verzichtet. Die Probleme dieser Spannungsvorsteuerung resultieren aus den dynamischen Spannungskomponenten $U_{sd dyn}$ und $U_{sq dyn}$, die aus einer Differenz des Ständerfluss-Sollwertes $\Psi_{sd soll}$ und $\Psi_{sq soll}$ bestimmt werden müssen.

Diese in der FIG 4 dargestellte Struktur der Vorsteuerung der Ständerspannung \underline{U}_s kann mit einem Spannungssteuersatz zur vollständigen Struktur einer Vorsteuerung erweitert werden. Eine derartige Struktur ist in der FIG 5 schematisch dargestellt. In einem Steuersatz 30 erfolgt die Anpassung an eine momentane Zwischenkreisspannung U_D sowie die Rücktransformation von flusssynchronen in ein statorfestes Koordinatensystem zur Ausgabe von Schaltzeitpunkten. In dieser Struktur der Vorsteuerung für einen Spannungssteuersatz ist mit 32 eine Pulsmustertabelle mit optimierten Pulsmustern bezeichnet, mit 34 der Parameter Streuinduktivität L_σ mit 36 der Parameter Ständerwiderstand R_s mit 38 eine Differentiations-Einrichtung und mit 40 jeweils eine Additionsstelle. Für eine dynamisch exakte Vorsteuerung muss die Frequenzabhängigkeit, nämlich die Reduzierung bei höheren Frequenzen, des Parameters Streuinduktivität L_σ berücksichtigt werden. Gemäß dieser Struktur wird die sich aus Rotorfluss $\underline{\Psi}_R$ und durch den Ständerstrom \underline{I}_s verursachten Streufluss $\underline{\Psi}_\sigma$ ergebene Zwischengröße Ständerfluss $\underline{\Psi}_s$ differenziert, um die Ständerspannung \underline{U}_s zu erhalten. Dies ist bei asynchroner Modulation problemlos möglich, da in einem Schaltzyklus jeder mögliche Spannungszeiger \underline{U}_s als Mittelwert eingestellt werden kann.

Der dynamische Anteil des Differenzierens von Flussänderungen kann bei synchronen Pulsmustern nicht ausreichend schnell berücksichtigt werden, da die Zeitdiskretisierung durch die

Pulsmuster für eine quasikontinuierliche Behandlung zu groß ist. Dieses lässt sich dadurch erklären, dass in der synchronen Taktung die Schaltreihenfolge der Spannungsraumzeiger fest definiert ist. Dadurch kann die Spannung nicht beliebig
5 nach Betrag und Winkel beeinflusst werden, so dass die Differentiation des Ständerflusses $\underline{\Psi}_s$ nicht in den gewünschten Ständerspannungs-Raumzeiger \underline{U}_s umgesetzt werden kann. D.h., dass die Vorsteuerung bei optimierten Pulsmuster nur stationär wirken kann.

10

Da bei synchroner Taktung die zeitkontinuierliche Differentiation des Flusses zur Spannung zur Erreichung einer stationär und dynamisch richtigen Vorsteuerung nicht möglich ist, wird erfindungsgemäß diese in einen zeitdiskreten, pulssynchronen
15 Steuersatz verlagert. Die Eingangsgröße eines zugehörigen Steuersatzes ist dann nicht mehr die Ständerspannung \underline{U}_s , sondern ihr Integral über der Zeit, also eine Spannungszeitfläche, die in dem jeweiligen diskreten Abtastintervall von einem Steuersatz 42 realisiert werden muss. Die Struktur der
20 Vorsteuerung für einen Steuersatz 42, der Spannungszeitflächen umsetzen muss, ist in der FIG 6 schematisch veranschaulicht. Da Spannungszeitflächen von der Dimension einen Fluss entsprechen, werden diese Spannungszeitflächen im folgenden als Klemmenfluss $\underline{\Psi}_k$ bezeichnet. Die zeitdiskrete Differentiation des Klemmenflusses $\underline{\Psi}_k$ im Steuersatz 42 muss natürlich
25 nach der Rücktransformation in das statorfeste Koordinatensystem erfolgen. Die Bestimmung der Ein- und Ausschaltzeitpunkte der diskreten Spannungszustände auf Basis der Lage des Ständerfluss-Raumzeigers $\underline{\Psi}_s$ zum Rotorfluss-Raumzeiger $\underline{\Psi}_r$ bedingt natürlich weitgehende Änderungen in der Behandlung und
30 Ausgabe der optimierten Pulsmuster im Steuersatz 42.

Optimierte Pulsmuster liegen als vorberechnete Schaltwinkel vor, die vom Aussteuergrad abhängig und in diskreten Schritten berechnet und abgelegt sind. Die Zwischenkreisspannung U_D
35 wird dabei für ein Abtastintervall als konstant angenommen. Die Umrechnung der Sollspannung in den Aussteuergrad a für

die aktuelle Zwischenkreisspannung U_D sowie von Schaltwinkeln in Schaltzeiten erfolgt im Steuersatz 42.

- Bei einem Zweipunktwechselrichter gibt es sechs Spannungszeiger U_0, \dots, U_5 mit der Länge $2/3 U_D$ und zwei Nullzeiger U_6, U_7 mit der Länge Null. Diese Spannungszeiger U_0, \dots, U_7 sind in der FIG 7 in einem statorfesten Raumzeiger-Koordinatensystem α, β dargestellt. Wenn die Spannungszeitflächen wie ein Fluss (Klemmenfluss) betrachtet werden, können sie im Raumzeigersystem ebenso wie die Spannungen U_0, \dots, U_7 als Zeiger beschrieben werden. Ein solcher Klemmenflusszeiger Ψ_K bewegt sich, wenn einer der sechs Spannungszeiger U_0, \dots, U_5 eingeschaltet ist, mit der Geschwindigkeit $2/3 U_D$ pro Sekunde in Richtung des Spannungszeigers, bei eingeschaltetem Nullzeiger U_6, U_7 bleibt er stehen. Wenn bei Grundschiwingungstaktung die Spannungszeiger U_0, \dots, U_5 nacheinander geschaltet werden, ergibt sich ein sechseckförmiger Verlauf des Klemmenflusszeigers Ψ_K .
- Die Grundidee des Spannungszeitflächen-Steuersatzes 42 ist die Zusammenlegung von stationärer und dynamischer Vorsteuerung und der Fehlerkorrektur für die Spannungszeitflächen, so dass diese eingepreßt werden.
- Wenn die Spannungszeitflächen bzw. der Klemmenfluss Ψ_K sich auf der für den momentanen Zustand gültigen stationären Wert befindet, sind die primär zu regelnden Größen Drehmoment und Ständerstrom-Komponenten exakt eingestellt. Voraussetzung ist, dass der Wert stationär mit der maximal zur Verfügung stehenden Spannung realisierbar ist.

Bei synchronen Pulsmustern wird anders als bei asynchroner Modulation durch den Einsatz des Flusssteuersatzes die stationäre Spannung inklusiv Oberschwingungen vorgesteuert, obwohl die Regelung selbst natürlich auch nur Grundschiwingungs-Sollwerte liefert. Aus den Grundschiwingungs-Sollwerten der Regelung wird für den Steuersatz die Soll-Flusskurve ermittelt,

aus der dann im Steuersatz augenblickswertorientiert die Schalthandlungen bestimmt werden, wodurch die Oberschwingungen bestimmt werden.

- 5 Während die Soll-Spannung nur stationär gilt, gilt die Soll-Flussbandkurve stationär und dynamisch. Damit ist erreicht worden, dass die dynamische Vorsteuerung mit der erforderlichen Differentiation in den zeitdiskret arbeitenden Steuersatz 42 verlagert ist. Unter der Zeitdiskretisierung ist hier
10 die Taktung durch das synchrone Pulsmuster zu verstehen.

Durch das geregelte Nachfahren der Soll-Flussbahnkurve ist die Nachführung der Integrationskonstante von Spannung zu Fluss automatisch gewährleistet, Ausgleichsvorgänge können
15 nicht mehr auftreten.

In den Pulsmustertabellen des Steuersatzes 42 müssen nun statt Spannungszeigern und Schaltwinkeln, die in die Schaltzeit umgerechnet werden, Spannungszeiger und Klemmflusswerte
20 (= Spannungsintegrale) vorgegeben werden. Die Fluss-Sollwerte Ψ_{Ksoll} ergeben eine zu erreichende Schaltschwelle, aus der mit der momentanen Zwischenkreisspannung U_D und des bisher erreichten Fluss-Istwertes Ψ_K die Schaltzeit T_{schalt} jeweils neu berechnet wird. Damit werden alle Fehler des Klemmenflusses
25 Ψ_K bei Erreichen der jeweiligen Schaltschwelle korrigiert. Das Regelverfahren der Fehlerkorrektur hat damit Dead-Beat-Verhalten.

Da der Klemmenfluss Ψ_{Ksoll} nicht direkt als Stellgröße für die
30 Drehmoment-Einprägung geeignet ist, weil die Spannungsabfälle am ohmschen Ständerwiderstand R_s nur stationär berücksichtigt werden können, darf zur Korrektur auch nur ein quasistationärer Klemmenfluss-Istwert Ψ_K verwendet werden.

35 Die Korrekturmaßnahmen an den Pulsmustern zur Einhaltung der vorgegebenen Klemmenflussbahnkurve führen gemäß FIG 8 zu den folgenden unterschiedlichen Schaltschwellen.

Typen von Umschaltungen:

1. "Ecke" (Wechsel von einem Spannungszeiger zum anderen):

Flussbetragsschwelle: Die Projektionsachse steht senkrecht zu neuem Zeiger, die Schaltschwelle entspricht dem
5 Schnittpunkt der neuen Flusstrajektorie mit der Projektionsachse.

Wirkung: Durch die Bestimmung des Klemmenfluss-Istwertes auf Basis der Sollständerströme gelingt es, den Ständerfluss-Istwert auch dynamisch zu zentrieren und gleichzeitig den Flussbetragsfehler aufgrund des Spannungsabfalls
10 am Ständerwiderstand R_s mit sehr guter Näherung vorgesteuert zu kompensieren. Der Fluss wird zentriert, der Flussbetragsfehler wird korrigiert.

- 15 2. "Null Ein" (Wechsel von einem Spannungszeiger zu einem Nullzeiger, der nächste Spannungszeiger ist der gleiche): Die Projektionsachse steht senkrecht zum vorhergehenden (1. Halbsektor) bzw. übernächsten Spannungszeiger (2. Halbsektor).

- 20 3. "Null Ecke" (Wechsel von einem Spannungszeiger zu einem Nullzeiger, der nächste Spannungszeiger ist ein anderer): Die Projektionsachse steht senkrecht zum nächsten Spannungszeiger.

- 25 4. "Null Aus" (Wechsel vom Nullzeiger zu einem Spannungszeiger):

Flusswinkelschwelle: Der Nullzeiger wird aus- und der nächste Spannungszeiger eingeschaltet, wenn der laufende
30 Sollwinkel des Klemmenflusses gleich dem Umschaltwinkel des Pulsmusters wird.

Wirkung: Da der Istfluss-Raumzeiger beim Einschalten des Nullzeigers an der vom Pulsmuster vorgegebenen Stelle der Flusstrajektorie angehalten hat, ist beim Weiterlaufen
35 beim Erreichen des Ausschalt-Sollwinkels durch den Sollfluss-Raumzeiger der Sollwinkel zwischen Ständerfluss und Rotorfluss-Raumzeiger und damit das Drehmoment sehr genau

eingestellt. Ein Winkelfehler wird durch das Einschalten des Nullzeigers durch den Istwert und das Ausschalten aufgrund des Sollwertes bestmöglich kompensiert.

- 5 Die Pulsmustertabellen bestehen somit aus einer Abfolge dieser Umschaltungen, wobei neben dem Wert der Flussschwelle der Typ der Umschaltung, der Schaltzustand (Spannungszeiger) und die Projektionsachse abgelegt sind.
- 10 In der FIG. 9 ist die Realisierung eines vorteilhaften Verfahrens nach der Erfindung schematisch veranschaulicht. Gemäß dieser Darstellung wird aus einem vorbestimmten Rotorflussbetrag $|\Psi_{R_{soll}}|$ mittels eines Flussreglers 12 eine flussbildende Stromkomponente $I_{sd_{soll}}$ ermittelt. Aus einem Drehmoment-Sollwert M_{soll} wird mittels eines Drehmomentreglers 8 und mit dem aus dem Motormodell 14 ermittelten Rotorflussbetrags-Istwert $|\Psi_R|$ eine momentenbildende Stromkomponente $I_{sq_{soll}}$ berechnet. Daneben wird mit einer berechneten stationären Rotorschleppfrequenz ω_R eine für die Pulsmusterauswahl und für Vorausberechnungen benötigte vorgesteuerte, stationär gültige Ständerkreisfrequenz ω_s (= Winkelgeschwindigkeit des Ständerflusses) bestimmt. Diese beiden Stromkomponenten $I_{sd_{soll}}$ und $I_{sq_{soll}}$ werden jeweils betragsmäßig begrenzt, bevor diese wie in der Struktur nach FIG. 6 mit einer Einrichtung 34 und 36 multipliziert werden. Am Ausgang der Einrichtung 34 steht dann ein Streufluss-Sollwert $\underline{\Psi}_\sigma$ an, der einen Rotorfluss-Istwert $\underline{\Psi}_R$ aufaddiert wird, so dass am Ausgang des Addierers 40 ein Ständerfluss-Sollwert $\underline{\Psi}_{s_{soll}}$ ansteht. Dieser Ständerfluss-Sollwert $\underline{\Psi}_{s_{soll}}$ wird mit einer imaginären Ständerkreisfrequenz ω_s multipliziert, dessen Produkt mittels eines weiteren Addierers 40 auf einem am Ausgang der Einrichtung 36 anstehenden Spannungswert aufaddiert wird. Dadurch erhält man einen stationären Sollwert der Ständerspannung $\underline{U}_{s_{stat}}$. Dieser Sollwert des stationären Ständerspannungswerts $\underline{U}_{s_{stat}}$ wird auf die Zwischenkreisspannung U_b normiert. Die orthogonalen Komponenten dieser normierten stationären Ständerspannung $\underline{u}_{s_{stat}}$ werden in polare Komponenten Aussteuergrad a und Spannungswinkel

δ_u umgewandelt. Dazu wird ein Koordinatenwandler 46 verwendet. Die polare Komponente Aussteuergrad a wird einerseits direkt zur Adressierung einer Winkeltabelle optimierter Pulsmuster und geglättet zur Adressierung einer Pulsmusterauswahl-
5 walebene verwendet und andererseits zur Ermittlung eines Grundswingungs-Klemmenflussbetrag $|\Psi_K|$ verwendet. Dazu wird die polare Komponente Aussteuergrad a einem Multiplizierer 48 zugeführt. Am zweiten Eingang des Multiplizierers 48 steht die Zwischenkreisspannung U_D an. Dadurch wird eine Entnormie-
10 rung herbeigeführt. Der Wert am Ausgang dieses Multiplizierers 48 wird anschließend durch die Ständerkreisfrequenz ω_s geteilt, so dass der Grundswingungs-Klemmenflussbetrag $|\Psi_K|$ ansteht.

15 Aus der polaren Komponente Spannungswinkel δ_u (Winkel zwischen Spannung \underline{U}_{Sstat} und Rotorfluss $\underline{\Psi}_R$ gemäß FIG 2) wird durch Subtraktion von 90° ein Winkel δ_{Ψ_K} (bzw. χ_{soll}) zwischen Klemmenfluss $\underline{\Psi}_K$ und Rotorfluss $\underline{\Psi}_R$ ermittelt. Auf diesen Winkel δ_{Ψ_K} wird mittels eines weiteren Addierers 50 der laufende
20 Rotorflusswinkel γ_{Ψ_R} des Motormodells 14 aufaddiert und man erhält den laufenden Klemmenfluss-Sollwinkel γ_{Ψ_Ksoll} für einen Spannungszeitflächen-Steuersatz.

In der FIG 10 sind beispielhaft Drehmoment- und Flussreglung
25 8 und 12 explizit dargestellt, wogegen in der FIG 11 die anschließende stationäre und dynamische Vorsteuerung veranschaulicht ist.

Durch den Umweg über die Berechnung der stationären Ständer-
30 spannung \underline{U}_{Sstat} erhält man einerseits den Aussteuerungsgrad a und andererseits kann man diesen Aussteuerungsgrad a in Feldschwächbereich begrenzen. Der Aussteuerungsgrad a wird für die Auswahl eines Pulsmusters benötigt. Dieser Aussteuerungsgrad a wird direkt zur Adressierung der Winkeltabelle des Pulsmus-
35 ters und geglättet zur Adressierung der Pulsmusterauswahl-ebene U/f-Ebene verwendet. Bei der Begrenzung des Aussteuergrades a im Feldschwächbereich (FIG 11) muss die Berechnung des

Spannungswinkels δ_u so erfolgen, dass die stationär momentenbildende Spannungskomponente u_{sdstat} (FIG 11) weiter ihren Sollwert entspricht. Dieser Spannungswinkel δ_u wird mit folgender Gleichung:

$$\delta_u = \arcsin \frac{u_{sdstat}}{a_{begr}} + 90^\circ = \arcsin \frac{US_{dstat}}{a_{begr} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot U_D} + 90^\circ$$

berechnet.

Gemäß der FIG 11 muss der Sollwert der feldbildenden Stromkomponente I_{sdso11} für die Berechnung des ohmschen Spannungsabfalls am Ständerwiderstand R_s , der in den Kanal der momentenbildenden Spannungskomponente U_{sdstat} hineinwirkt, auf den Wert begrenzt werden, der dem im momentanen Betriebszustand realisierbaren Fluss entspricht. Dies ist erforderlich, damit bei Aussteuergradbegrenzung kein stationärer Fehler des vorgesteuerten Drehmoments auftritt.

Bei der Ermittlung der Pulsmuster ist der ohmsche Ständerwiderstand R_s ohne Belang, da er für Oberschwingungen gegenüber der Streureaktanz vernachlässigbar ist. Dadurch wird eine lastunabhängige Vorausberechnung der Pulsmuster möglich. Durch diese ist dann die Klemmenflussbahnkurve bestimmt. Für die Grundschiwingung, über die das Drehmoment M_{so11} eingestellt wird, kann der ohmsche Ständerwiderstand R_s allerdings nicht vernachlässigt werden. Der Spannungsabfall an ihm verursacht die Differenz zwischen Klemmenfluss $\underline{\Psi}_k$ und Ständerfluss $\underline{\Psi}_s$.

Die Annahme, dass der geforderte stationäre Zustand bei synchronen Pulsmustern vor allem bei vorhandenen Nullzeigern U_6 , U_7 praktisch mit jedem neuen Schaltzustand erreicht werden kann, erlaubt es, beim Vergleich eines Klemmenfluss-Istwertes $\underline{\Psi}_k$ mit ausgewählten Flussbetragsschwellen Ψ_{kschw} die stationären Spannungsabfälle am ohmschen Ständerwiderstand R_s zugrunde zu legen, die den - als stationär betrachteten - Strom-Sollwerten entspricht.

Dazu ist es gemäß FIG 12 erforderlich zur Berechnung des aktuellen Klemmenflusses, vor der Integration der Ständerspannung \underline{U}_s den durch den momentanen Ständerstrom \underline{I}_s verursachten Spannungsabfall am ohmschen Ständerwiderstand R_s abzuziehen, und damit den Ständerflussmomentanwert zu berechnen. Die Integration erfolgt zweckmäßig in ständerfesten Koordinaten α , β , die Ständerflusskomponenten $\Psi_{s\alpha}$ und $\Psi_{s\beta}$ werden dann in das rotorflusssynchrone Koordinatensystem d , q mittels eines Koordinatendreher 52 gedreht, damit mit den in Rotorkoordinaten vorhandenen Strom-Sollwerten $I_{sd\text{soll}}$ und $I_{sq\text{soll}}$ die stationären Klemmenflusskomponenten Ψ_{Kq} und Ψ_{Kd} bestimmt werden können. Für die weitere Verwendung dieser Klemmenflusskomponenten Ψ_{Kq} und Ψ_{Kd} werden diese mittels eines weiteren Koordinatendreher 54 wieder in ständerfeste Koordinaten $\Psi_{K\alpha}$ und $\Psi_{K\beta}$ zurückgedreht. Am Ausgang dieses Koordinatendreher 54 stehen dann die ständerfesten Klemmflusskomponenten $\Psi_{K\alpha}$ und $\Psi_{K\beta}$ an. Dadurch wird in guter Näherung statt dem Klemmenfluss $\underline{\Psi}_K$ der Ständerfluss $\underline{\Psi}_s$ dynamisch eingeprägt, und damit direkt Ständerstrom \underline{I}_s und Drehmoment M . Ausgleichsvorgänge durch den ohmschen Ständerwiderstand R_s werden vermieden.

In der FIG 13 ist die Struktur eines Spannungszeitflächen-Steuersatzes im Grunddrehzahlbereich näher dargestellt. In dieser Struktur sind mit 56, 58 und 60 jeweils ein Speicher, mit 62 eine Einrichtung zur Stromrichterlinearisierung, mit 64 eine Einrichtung zur Berechnung von Schaltzeiten für Flussbetragsschwellen, mit 66 eine Einrichtung zur Berechnung von Schaltzeiten für Flusswinkelschwellen, mit 68 eine Einrichtung zur Ermittlung eines Klemmfluss-Istwertes $\underline{\Psi}_K$, mit 70 eine Sektorprojektionseinrichtung, mit 72 eine Einrichtung zur Generierung von Spannungskomponenten $U_{s\alpha}$ und $U_{s\beta}$ eines Ständerspannungs-Istwertes \underline{U}_s aus Schaltzuständen $T1$, $T2$ und $T3$ und mit 74 ist ein Schaltzeitähler bezeichnet. In den Speichern 56, 58 und 60 sind die off-line berechneten Puls-muster PM abgelegt, wobei in dem Speicher 56 eine Tabelle mit Flussbetragsschwellen und eine Tabelle mit Flusswinkelschwellen hinterlegt sind. Im Speicher 58 ist eine Tabelle mit Pro-

jektionsachsen abgelegt und in dem Speicher 60 ist eine Tabelle mit Schaltzuständen (Spannungszeiger) hinterlegt.

In Abhängigkeit der polaren Komponente Aussteuerungsgrad a der Stellgröße Klemmenfluss-Sollwert Ψ_{Ksoll} wird eine auf Nennfluss normierte Flussbetragsschwelle und eine entsprechende Flusswinkelschwelle $\gamma_{\Psi KSchw}$ aus dem Speicher 56 ausgelesen. Diese ausgelesene normierte Flussbetragsschwelle wird mittels eines Multiplizierers 76 mit der polaren Komponente Grundschrwingungs-Klemmenflussbetrag $|\Psi_K|_{soll}$ der Stellgröße Klemmenfluss-Sollwert Ψ_{Ksoll} multipliziert. Als Ergebnis erhält man eine zum Aussteuergrad a korrespondierende Flussbetragsschwelle Ψ_{KSchw} . Diese Flussbetragsschwelle Ψ_{KSchw} wird in der Einrichtung 64' zunächst mit einem projizierten Klemmenfluss-Istwert Ψ_{Kproj} verglichen, der am Ausgang der Sektorprojektionseinrichtung 70 ansteht. Die ermittelte Differenz wird einem Dividierer 78 zugeführt, an dessen zweiten Eingang ein Wert $1/\sqrt{3} U_D$ ansteht, der einer auf die Projektionsachse bezogene Bahngeschwindigkeit des Klemmenflusses Ψ_K entspricht. Am Ausgang dieses Dividierers 78 steht eine entsprechende Schaltzeit $T_{schalt\Psi}$ an, die einem Eingang des Speichers 60 mit der Tabelle Schaltzustände zugeführt wird. Mittels dieser Schaltzeit $T_{schalt\Psi}$ wird ein Nullzeiger U_6, U_7 , eine "Ecke" bzw. eine "Null Ecke" eingeschaltet.

Die aus dem Speicher 56 ausgelesene Flusswinkelschwelle $\gamma_{\Psi KSchw}$ wird in der Einrichtung 66 mit dem laufenden Klemmenfluss-Sollwinkel $\gamma_{\Psi Ksoll}$ verglichen, dessen Differenz durch die Bahngeschwindigkeit des Flusswinkels dividiert wird. Die Bahngeschwindigkeit ist proportional zur Ständerkreisfrequenz ω_s . Am Ausgang des Dividierers 78 steht eine Schaltzeit $T_{schalt\gamma}$ für das Ausschalten eines Nullzeigers an, die ebenfalls einem zweiten Eingang des Speichers 60 zugeführt wird.

In Abhängigkeit dieser Schaltzeiten $T_{schalt\Psi}$ und $T_{schalt\gamma}$ wird der nächste (i-te) Schaltzustand aus dem Speicher 62 ausgelesen und die Schaltzeit dem zugehörigen Wechselrichterstrang

zugewiesen. Die sich ergebenden Schaltzeiten T_1 , T_2 und T_3 werden der Einrichtung 62 zur Stromrichterlinearisierung und einem Koordinatenwandler 82 der Einrichtung 72 zur Generierung von Spannungskomponenten $U_{s\alpha}$ und $U_{s\beta}$ eines Ständerspannungs-Sollwertes \underline{U}_s zugeführt. Die beiden Ausgänge dieses Koordinatenwandlers 82 sind jeweils mit einem Multiplizierer 84 und 86 verbunden, an deren zweiten Eingängen jeweils der Faktor $2/3U_D$ ansteht. An den Ausgängen dieser beiden Multiplizierer 84 und 86 steht jeweils eine Spannungskomponente $U_{s\alpha}$ bzw. $U_{s\beta}$ eines Ständerspannungs-Sollwertes \underline{U}_s an. Aus diesen Spannungskomponenten $U_{s\alpha}$ und $U_{s\beta}$ werden Klemmenfluss-Istwertkomponente $\Psi_{K\alpha}$ und $\Psi_{K\beta}$ mit der Einrichtung 68 berechnet, wobei in der FIG 12 ein Ausführungsbeispiel für diese Einrichtung 68 veranschaulicht ist. Mittels der Sektorporjezierungseinrichtung 70 erhält man aus diesen beiden berechneten Klemmenfluss-Istwertkomponenten $\Psi_{K\alpha}$ und $\Psi_{K\beta}$ einen auf den Sektor Null projizierten Klemmenfluss-Istwert Ψ_{Kproj} .

Mittels der Einrichtung 62 werden stromabhängige Spannungsfehler des Pulsstromrichters 24 auch bei synchronen Pulsmustern kompensiert. Dazu sind dieser Einrichtung 62 die Stromrichter-Ausgangsströme I_1 , I_2 und I_3 zugeführt. Der nachgeschaltete Schaltzeitähler 74 gewährleistet die exakte Ausgabe der voraus berechneten Zeiten und damit ein einwandfreies stationäres Verhalten des Klemmenfluss-Steuersatzes wie ein Spannungssteuersatz. Da nach der Stromrichterlinearisierung die Reihenfolge der Schaltzustände unter Umständen nicht mehr der vom Pulsmuster vorgegebenen entspricht, sollte zur Vermeidung eines softwaremäßigen Neusortierens der Umschaltung eine Zählerhardware eingesetzt werden, bei der die Reihenfolge der Ausgabe nur von den geladenen Schaltzeiten und nicht von der Reihenfolge des Ladens abhängt.

Bei fehlenden oder zu kurzen Nullzeigern U_6 , U_7 kann ein Winkelfehler oder ein dynamischer Spannungswinkelanteil nicht mehr über deren Veränderung ausgeregelt werden. Durch den Winkel wird aber hauptsächlich das Drehmoment beeinflusst,

das in jedem Betriebspunkt hochdynamisch und unabhängig vom Fluss einzustellen ist. Deshalb muss wie bei Vollaussteuerung die Drehmomentvorsteuerung und -regelung hier vorrangig vor der Flussvorsteuerung und -regelung behandelt werden, zumal
5 dynamische Änderung der feldbildenden Stromkomponente wegen der großen Rotationszeitkonstante nur sehr abgeschwächt auf den Rotorfluss Ψ_R wirken. Entscheidend ist allerdings, dass sich die feldbildende Stromkomponente $I_{sd\text{sol}1}$, die nicht mehr unabhängig zu beeinflussen ist, nicht nennenswert vergrößert,
10 da dann die für den Pulswechselrichter wichtige Strombegrenzung nicht mehr wirkt.

Der Winkel δ_{Ψ_K} des Klemmenfluss $\Psi_{K\text{sol}1}$ muss dazu über die Flussbetragsschwellen $\Psi_{K\text{Schw}}$ beeinflusst werden. Eine dynami-
15 sche Änderung der Flussbetragsschwellen $\Psi_{K\text{Schw}}$ bewirkt eine Verlängerung oder Verkürzung der Flussbahnkurve, die bei konstanter Zwischenkreisspannung U_D mit konstanter Bahngeschwindigkeit durchlaufen wird, und damit einen langsameren oder schnelleren Umlauf, wodurch sich der Winkel δ_{Ψ_K} des Klemmen-
20 flusses $\Psi_{K\text{sol}1}$ gegenüber dem Rotorfluss Ψ_R ändert.

Diese Bahnkurvensteuerung funktioniert im Prinzip wie die dynamische Feldschwächung bei asynchroner Modulation, bei synchroner Taktung ist sie jedoch im Gegensatz dazu exakt vor-
25 steuerbar, weil der Bereich der Bahnkurvenänderung von einem Sektor durch die Festlegung des Pulsmusters für einen Sektor bekannt ist.

Diese Änderung der Regelstruktur beginnt dynamisch wegen der
30 Abhängigkeit von den Nullzeiger U_6 bzw. U_7 bereits vor Vollaussteuerung bei Aussteuergraden von 0,8 bis 0,9, bei Erreichen der Aussteuerungsbegrenzung wirkt sie dann auch stationär, d.h. die feldbildende Stromkomponente $I_{sd\text{sol}1}$ und der Rotorfluss Ψ_R sind auch stationär nicht mehr zu beeinflussen.
35 Hier sorgt die stationäre Vorsteuerung für den korrekten Sollwinkel.

Zur Veränderung der Länge der Flussbahnkurve werden in dem momentanen Sektor die Umschaltsschwellen der Flussbahnkurve verändert, so dass diese zu kleineren oder größeren Werten parallel verschoben wird. In der FIG 14 ist eine Bahnkurven-
5 abkürzung für Vollblock und in der FIG 16 ist eine Bahnkurvenabkürzung bei einem Flankenpulsmuster, beispielsweise 3-fach-Flanke, gezeigt. Aus der Geometrie kann man entnehmen, dass die Bahnlängenveränderung und entsprechend die Winkeländerung linear von einer Schwellenänderung abhängt. Der erforderliche Anpassfaktor ergibt sich zu:
10

$$K_{\text{Schw}} = 1 - \frac{\Delta\delta_{\Psi K}}{60^\circ}$$

In der FIG 14 ergibt sich mit diesem Anpassfaktor K_{Schw} aus
15 einer vorausberechneten Flussbetragsschwelle $\Psi_{K_{\text{SchwB}}}$ eine reduzierte Flussbetragsschwelle $\Psi_{K_{\text{Schred}}}$, wodurch sich die Länge S_0 der Bahnkurve um ΔS verkürzt.

Bei Pulsmustern mit Umschaltungen an den Flanken (Eckenein-
20 klappungen) ergibt sich die Eigenschaft, dass die Länge S_0 der Bahnkurve ausschließlich von der maximalen Flussschwelle abhängt, und unabhängig von allen kleineren ist. Ein einfaches proportionales Verändern aller Flussschwellen erfüllt also die oben angegebenen Gleichungen. Diese Funktion ist da-
25 mit vom Pulsmuster unabhängig.

Grundsätzlich ist durch die dynamische Bahnlängenänderung ΔS ein Vor- und Zurückdrehen des Klemmenflusswinkels $\delta_{\Psi K}$ gegenüber dem Rotorfluss Ψ_R möglich, entsprechend einer Erhöhung
30 (in Richtung Fahren) oder Erniedrigung (in Richtung Bremsen) des Drehmoments M_{sol1} . Es muss allerdings beachtet werden, dass sich wegen der Flussverminderung beim Vordrehen ein kleinerer feldbildender Strom als im stationären Betrieb einstellt, beim Zurückdrehen wegen der Flusserhöhung aber ein
35 größerer. Deshalb darf ein Zurückdrehen des Winkels $\delta_{\Psi K}$ nur in einem sehr geringen Maß vorgenommen werden.

Dies stellt allerdings kein schwerwiegendes Problem dar, da größere Winkeländerungen nur bei Drehmomenterhöhung an der Aussteuerungsgrenze benötigt werden. Bei Drehmomenterniedrigung wird von der Vorsteuerung ein Aussteuergrad kleiner Eins
5 gefordert, der stationär zur Auswahl eines Pulsmusters mit Nullzeiger U_6 , U_7 führt. Dynamisch können hier asynchron Nullspannungsraumzeiger geschaltet werden. Die Anzahl der zugelassenen Nullspannungen pro Sektor kann dabei parametrisiert werden.

10

Wenn im Übergangsbereich zur Vollaussteuerung Nullzeiger U_6 , U_7 auftreten, die aber schon zu kurz für erforderliche Winkeländerungen sind, muss bei einer eingeleiteten Bahnkurvenverkürzung die hier durch erzielbare Winkelkompensation bei
15 den Nullspannungen berücksichtigt werden, da ansonsten eine Überkompensation erfolgen würde.

20

Dazu werden die Flussbetragsschwellen Ψ_{KSchw} , an denen die Nullzeiger U_6 , U_7 eingeschaltet werden, nicht mit dem Anpassfaktor K_{Schw} multipliziert, sondern unverändert gelassen. Da
in der ersten und zweiten Sektorhälfte die Einschaltsschwellen der Nullzeiger jeweils andere Projektionsachsen haben, ergibt sich daraus für die Ausschaltsschwellen der Nullzeiger mit FIG
16

25

- Nullzeiger in erster Sektorhälfte:

Einschalten um $\Delta s \approx \Delta \gamma_{\Psi K}$ vorgezogen, keine Korrektur des Ausschaltwinkels

- Nullzeiger in zweiter Sektorhälfte:

30

Einschalten nicht vorgezogen, verzögern des Ausschaltwinkels um $\Delta \gamma_{\Psi K}$.

35

Dadurch wird die Regelfunktion durch die Nullzeiger unterbunden und nur die Winkeländerungen durch die Bahnkurvenabkürzungen wirksam.

In der FIG 17 ist eine Struktur eines Spannungsflächen-Steuersatzes dargestellt, die sich von der Struktur gemäß FIG

13 nur durch eine Zusatzeinrichtung 88 unterscheidet. Diese
Zusatzeinrichtung 88 greift auf den laufenden Klemmenfluss-
Sollwinkel $\gamma_{\Psi_{Ksol1}}$ und der Flussbetragsschwelle Ψ_{KSchw} gesteuert
ein. Der Eingriff auf den laufenden Klemmenfluss-Sollwinkel
5 $\gamma_{\Psi_{Ksol1}}$ erfolgt in der zweiten Sektorhälfte, wogegen der Ein-
griff auf die Flussbetragsschwelle Ψ_{KSchw} bei einer "Ecke" er-
folgt. Für diese gesteuerte Einflussnahme weist diese Zusatz-
einrichtung 88 zwei Schalter 90 und 92 auf. Am Eingang des
Schalters 90 steht eine Winkeldifferenz des Winkels des Klem-
10 menfluss-Istwertes $\Psi_{K\alpha}$, $\Psi_{K\beta}$ zur Sollflussbahnkurve an. Dieser
Differenzwert kann am Anfang und in der Mitte eines jeden
Sektors bestimmt werden. Die Mitte eines jeden Sektors wird
mittels der Einrichtung 94 erkannt. Mittels der Einrichtung
96 und 98 wird der Winkel eines berechneten Klemmenfluss-
15 Istwertes $\Psi_{K\alpha}$, $\Psi_{K\beta}$ im voraus berechnet.

Aus dieser Winkeldifferenz wird anschließend der Anpassfaktor
 K_{Schw} ermittelt, mit dem außer beim Einschalten von Nullzei-
gern U_6 , U_7 die Flussbetragsschwelle Ψ_{KSchw} modifiziert wird.
20 In der zweiten Sektorhälfte muss die Winkeldifferenz noch zur
Flusswinkelschwelle $\gamma_{\Psi_{Ksol1}}$ zum Ausschalten von Nullzeigern ad-
diert werden.

Durch dieses erfindungsgemäße Verfahren wird die hohe Regel-
25 dynamik direkt schaltender Verfahren mit dem optimalen stati-
onären Verhalten off-line optimierter Pulsmuster kombiniert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur gesteuerten Einprägung eines Ständerstrom-Sollwertes ($\underline{I}_{S\text{soll}}$) und eines Drehmoment-Sollwertes (M_{soll}) für
5 eine stromrichter gespeiste Drehfeldmaschine (4), wobei in Abhängigkeit eines vorbestimmten Rotorfluss-Sollwertes ($\Psi_{R\text{soll}}$) und eines ermittelten Rotorfluss-Istwertes (Ψ_R) eine feldbildende Stromkomponente ($I_{\text{sd}\text{soll}}$) des Ständerstrom-Sollwertes ($\underline{I}_{S\text{soll}}$) und in Abhängigkeit eines vorbestimmten Drehmoment-Sollwertes (M_{soll}), des ermittelten Rotorfluss-Istwertes (Ψ_R) und
10 einer ermittelten drehmomentbildenden Stromkomponente (I_{sq}) eines gemessenen Ständerstromes (\underline{I}_S) eine drehmomentbildende Stromkomponente ($I_{\text{sq}\text{soll}}$) des Ständerstrom-Sollwertes ($\underline{I}_{S\text{soll}}$) berechnet werden, wobei in Abhängigkeit einer ermittelten Rotorschlupffrequenz (ω_R) und einer Kreisfrequenz (ω) ein Ständerkreisfrequenz-Istwert (ω_S) bestimmt wird, wobei aus diesen berechneten Werten ($I_{\text{sd}\text{soll}}$, $I_{\text{sq}\text{soll}}$, ω_S , Ψ_R) in Abhängigkeit der Parameter frequenzabhängige Streuinduktivität (L_σ) und Ständerwiderstand (R_S) als Stellgröße das Integral der Ständerspannung ($\Psi_{K\text{soll}}$) berechnet wird, aus dem eine aus abgespeicherten off-line optimierten Flussbahnkurven ausgewählte Flussbahnkurve abgeleitet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
25 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass in Abhängigkeit der berechneten Stromkomponenten ($I_{\text{sd}\text{soll}}$, $I_{\text{sq}\text{soll}}$), der Parameter frequenzabhängige Streuinduktivität (L_σ) und Ständerwiderstand (R_S), der Ständerkreisfrequenz (ω_S) und des Rotorfluss-Istwertes (Ψ_R) eine stationäre normierte Ständerspannung ($u_{S\text{stat}}$) berechnet wird, die mittels einer gemessenen Zwischenkreisspannung (U_D) normiert wird.

3. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass zur Ermittlung eines Klemmenfluss-Istwertes ($\underline{\Psi}_K$) vor der Integration der Ständerspannung (\underline{U}_S) von dieser ein durch den momentanen Ständerstrom (\underline{I}_S) verursachter Spannungsabfall am Ständer

der Widerstand (R_s) subtrahiert wird und nach der Integration nach Transformation in ein rotorflusssynchrones Koordinatensystem ein durch den einzuprägenden Ständerstrom-Sollwert ($I_{s\text{soll}}$) verursachter Spannungsabfall am Ständerwiderstand (R_s) dividiert durch die Ständerkreisfrequenz ω_s addiert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass aus der normierten stationären Ständerspannung ($u_{s\text{stat}}$) als polare Komponenten ein Aussteuerungsgrad (a) und ein Spannungswinkel (δ_u) berechnet werden.

5. Verfahren nach Anspruch 2 und 4, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit der gemessenen Zwischenkreisspannung (U_D) der berechneten Ständerkreisfrequenz (ω_s) aus dem Aussteuerungsgrad (a) gemäß folgender Gleichung:

$$|\underline{\Psi}_K| = \frac{a \cdot U_D \cdot \frac{2}{\pi}}{\omega_s}$$

ein Grundswingungs-Klemmenflussbetrag berechnet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 2 und 4, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit eines ermittelten laufenden Rotorflusswinkels (γ_{Ψ_R}) und eines ermittelten Winkels (δ_{Ψ_K}) zwischen Klemmenfluss (Ψ_K) und Rotorfluss (Ψ_R) gemäß folgender Gleichung:

$$\gamma_{\Psi_K\text{soll}} = \gamma_{\Psi_R} + \delta_{\Psi_K}$$

ein laufender Klemmenfluss-Sollwinkel ($\gamma_{\Psi_K\text{soll}}$) berechnet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 4,
 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die pola-
 re Komponente Spannungswinkel (δ_u) der normierten stationären
 Ständerspannungskomponente (u_{sdstat}) gemäß folgender Gleichung:

5

$$\delta_u = \arcsin \frac{U_{sdstat}}{a \cdot U_D \cdot 2/\pi} + 90^\circ$$

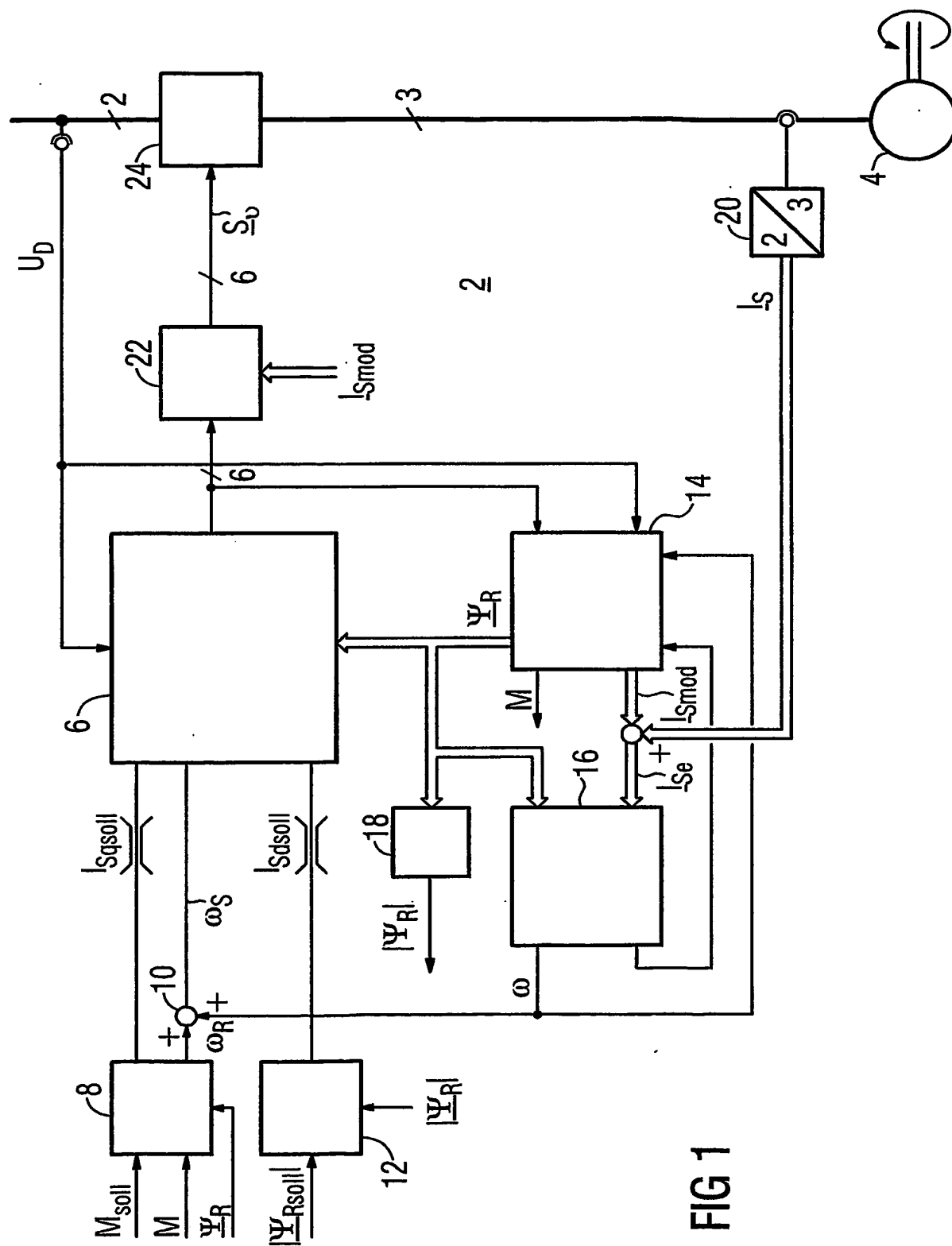
berechnet wird.

10 8. Verfahren nach Anspruch 7,
 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass der Win-
 kel (δ_{Ψ_K}) zwischen Klemmenfluss (Ψ_K) und Rotorfluss (Ψ_R) ge-
 mäß folgender Gleichung:

15

$$\delta_{\Psi_K} = \delta_u - 90^\circ = \arcsin \frac{U_{sdstat}}{a \cdot U_D \cdot 2/\pi}$$

berechnet wird.



3/13

FIG 3

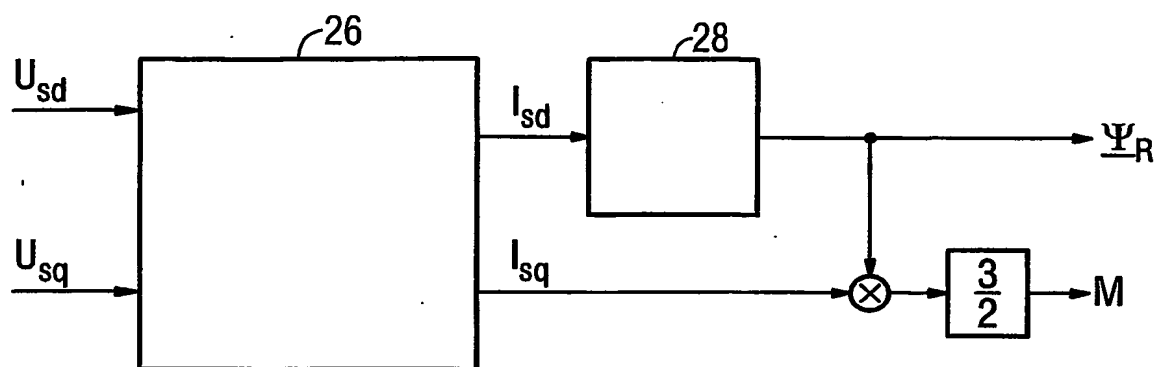
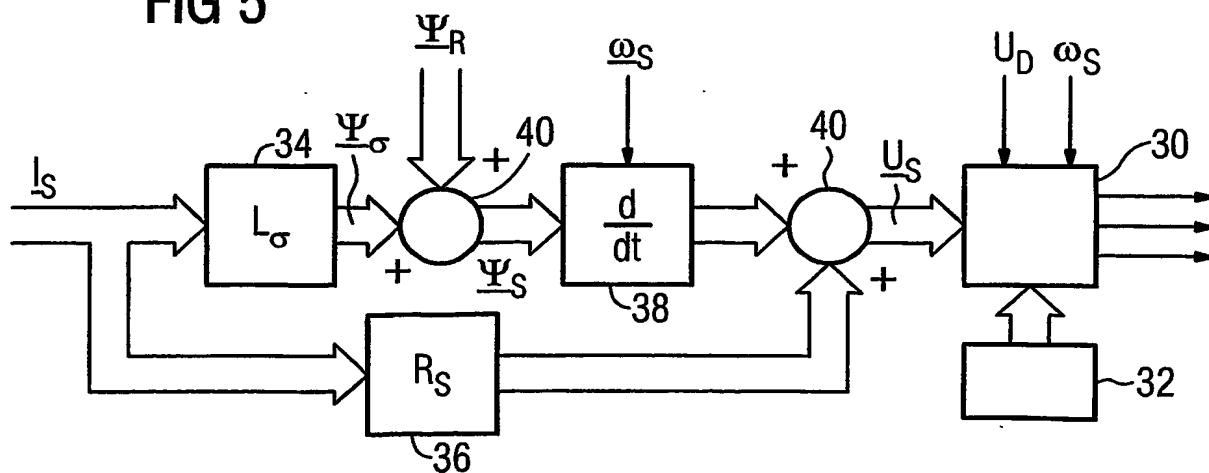
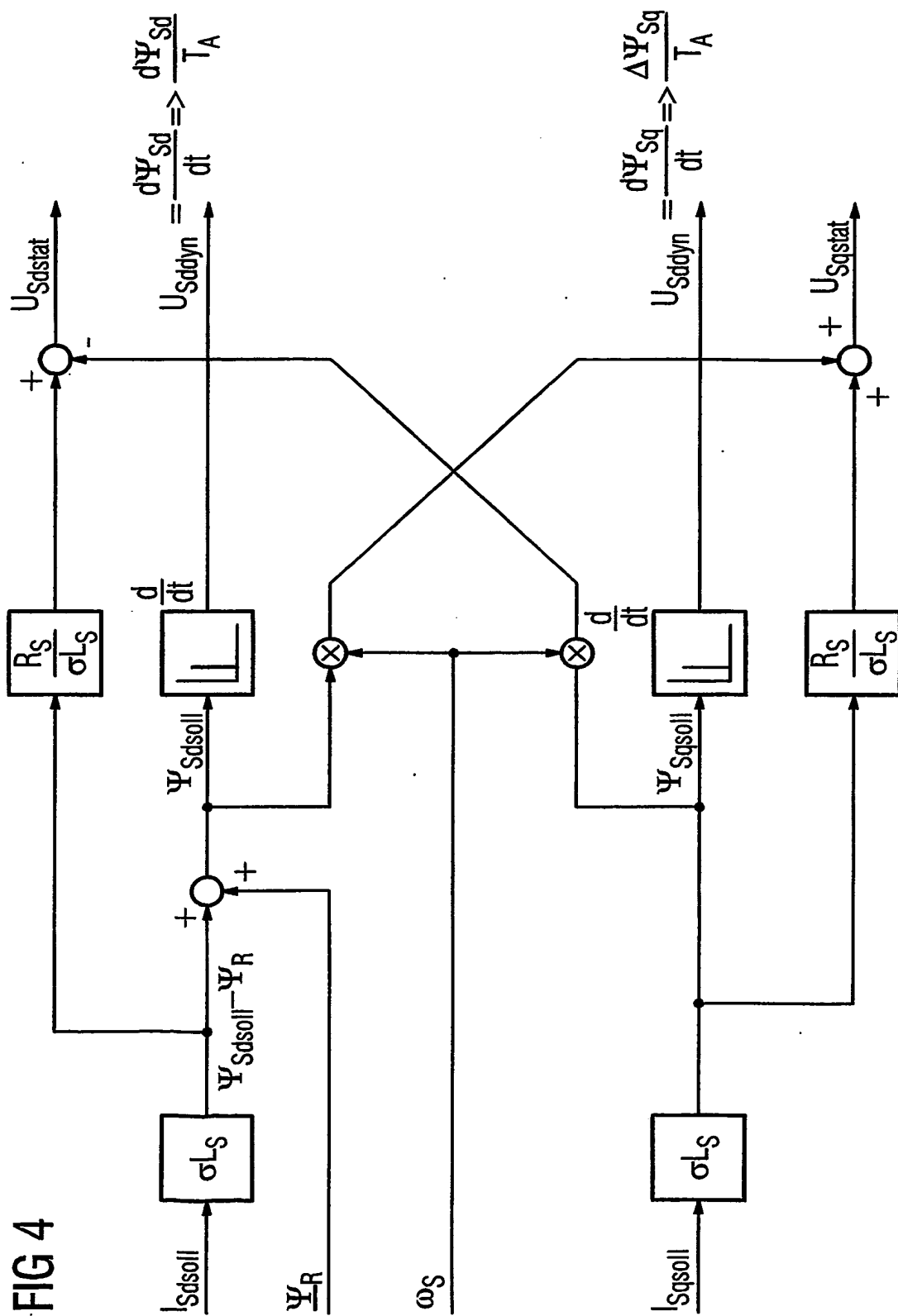


FIG 5

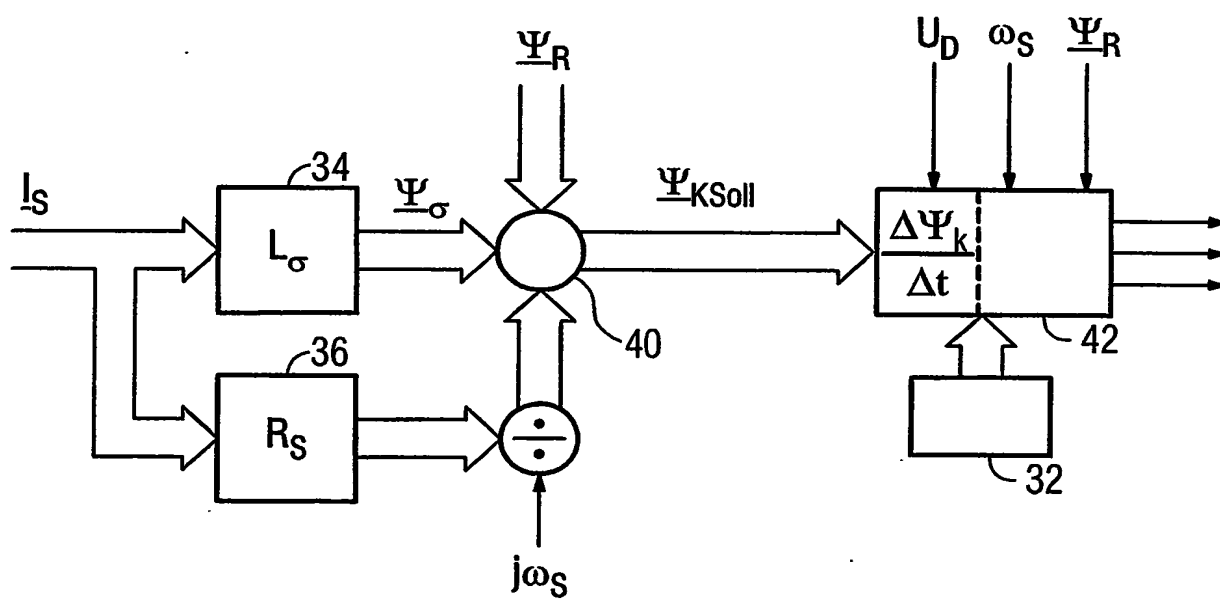


4/13



5/13

FIG 6



6/13

FIG 7

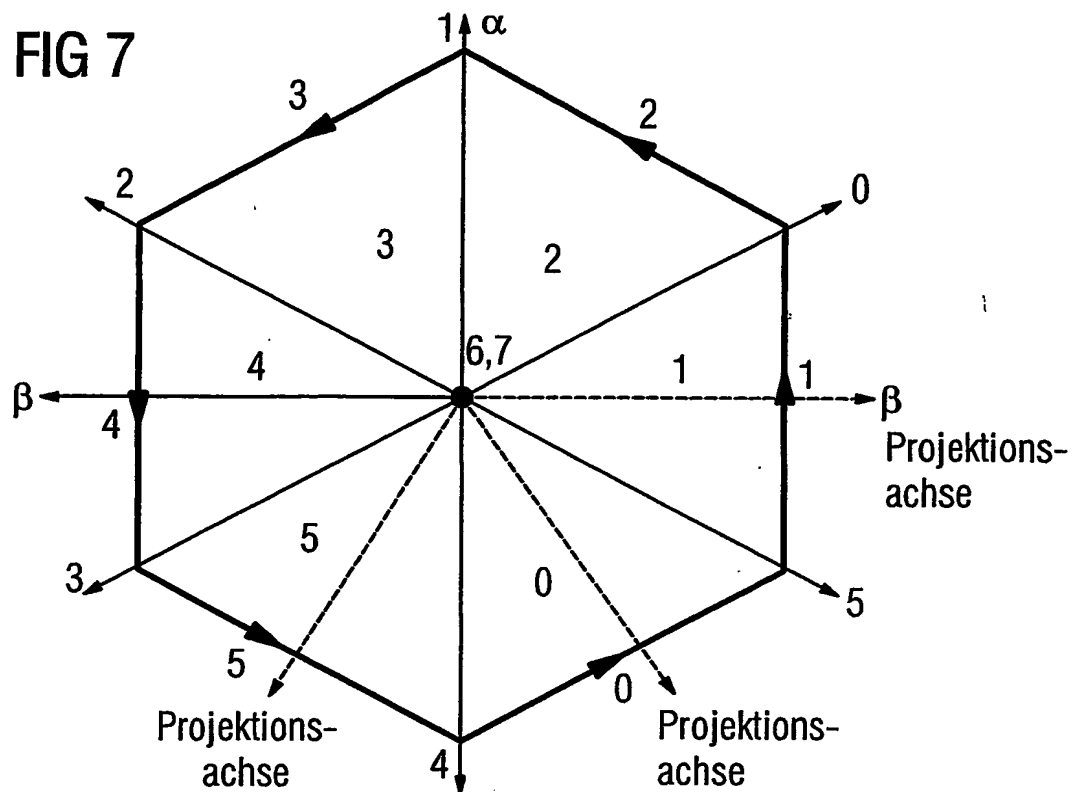


FIG 8

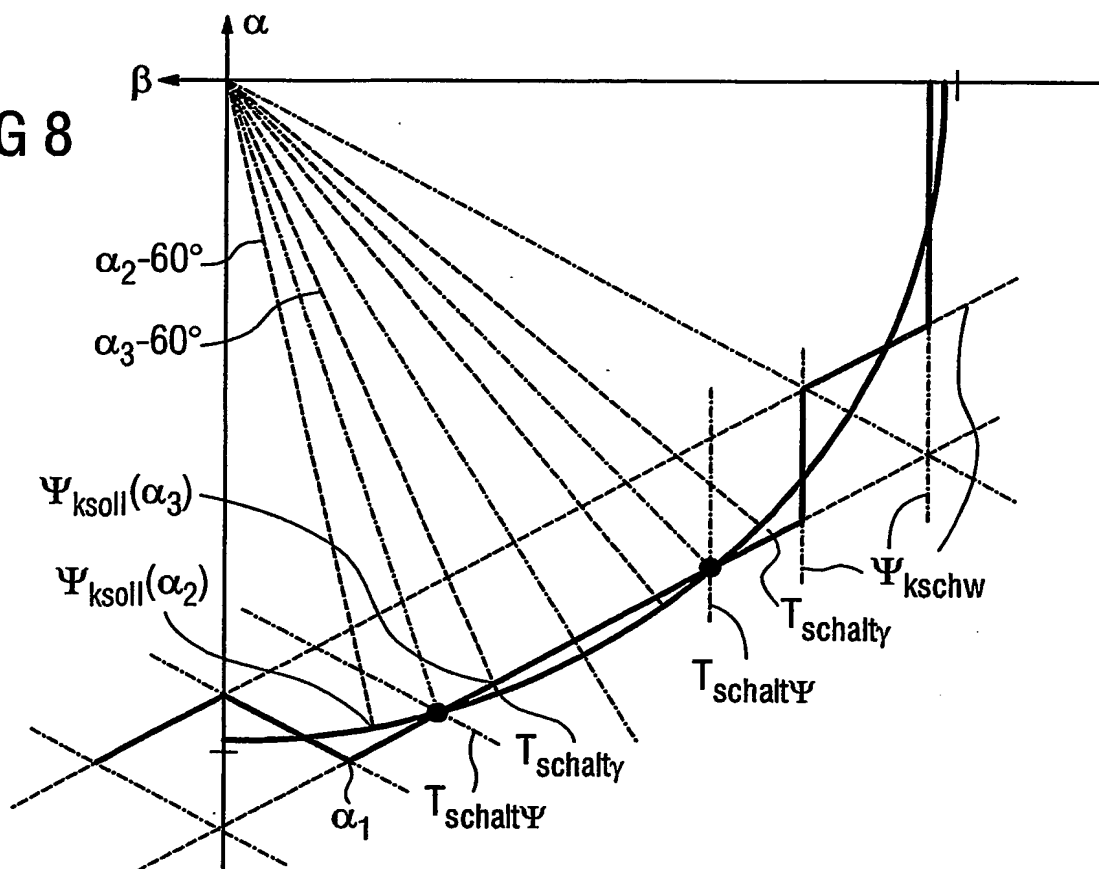
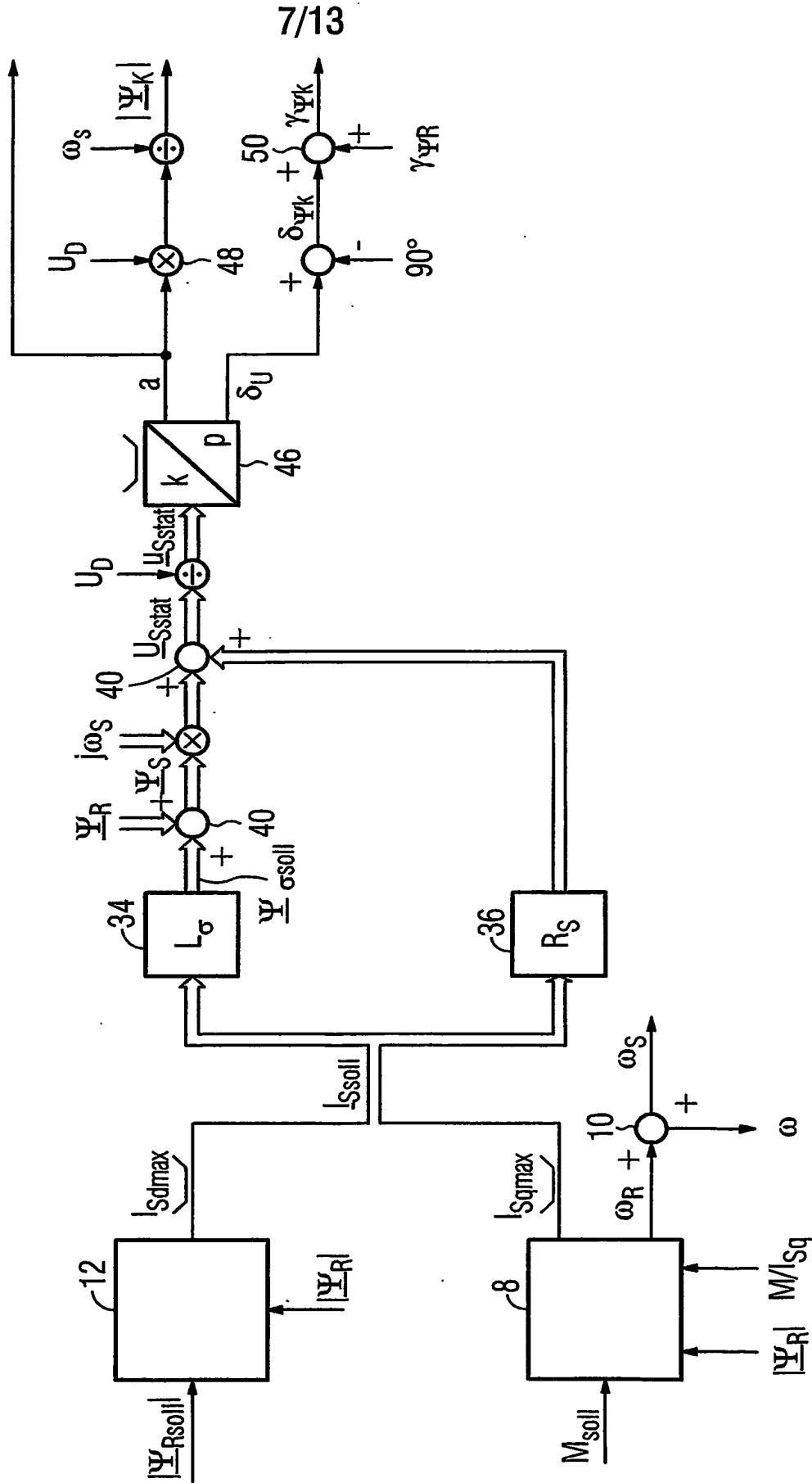


FIG 9



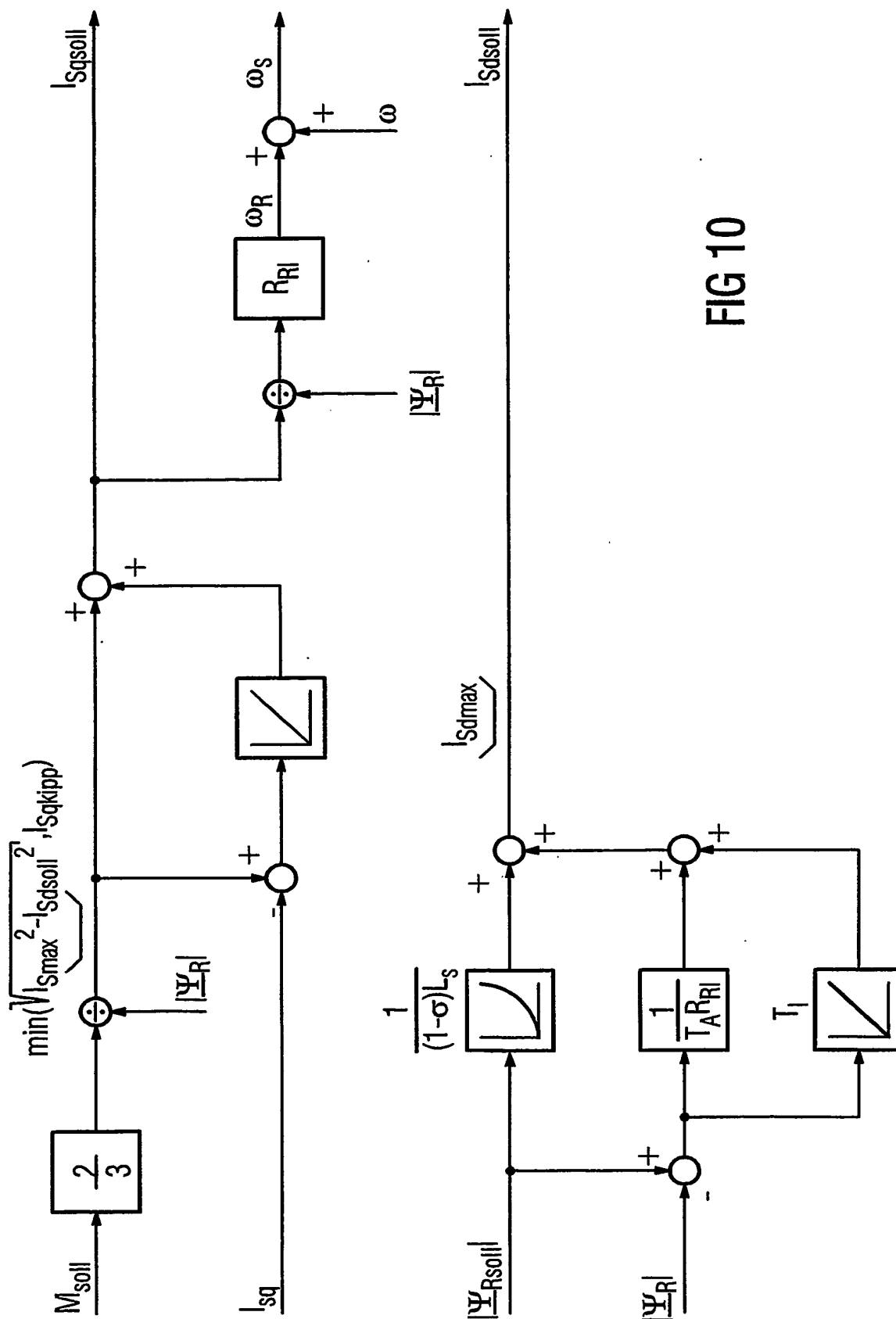
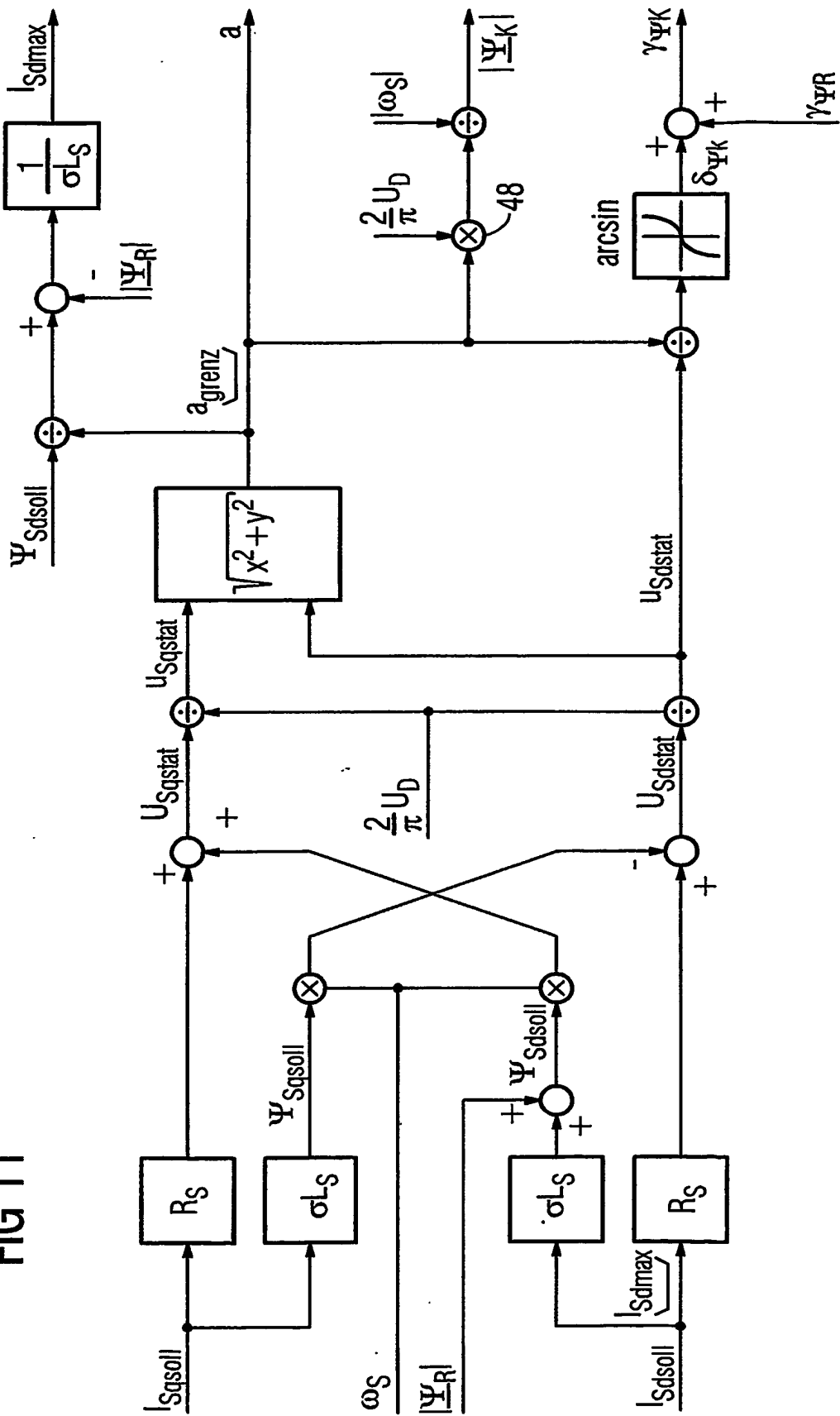


FIG 10

FIG 11



10/13

FIG 12

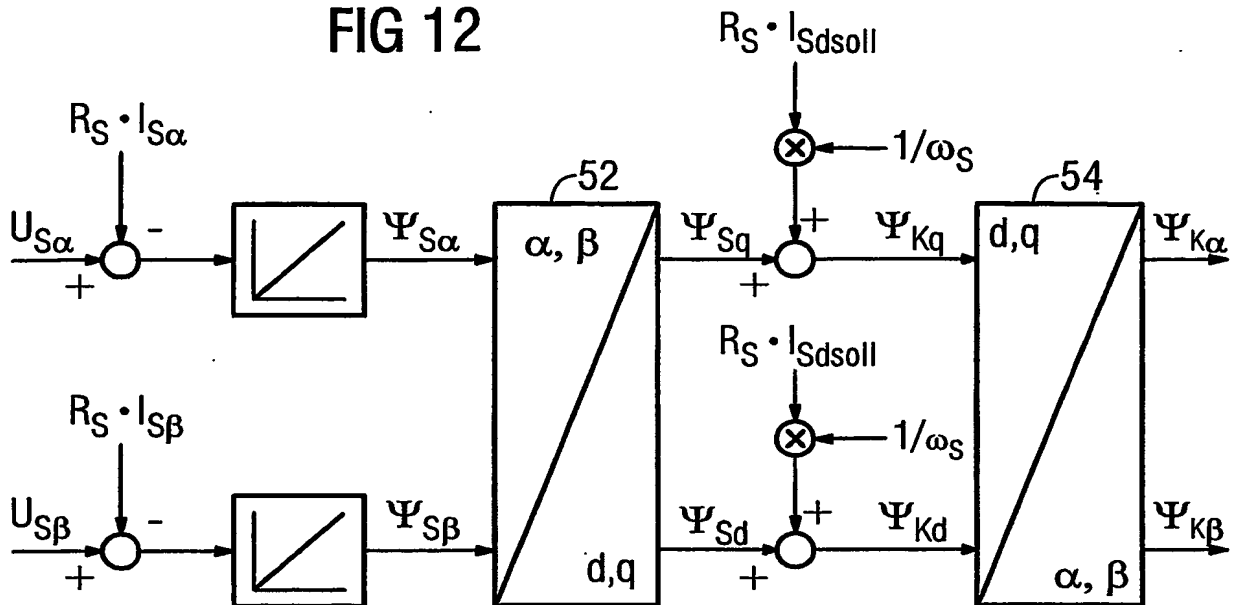


FIG 14

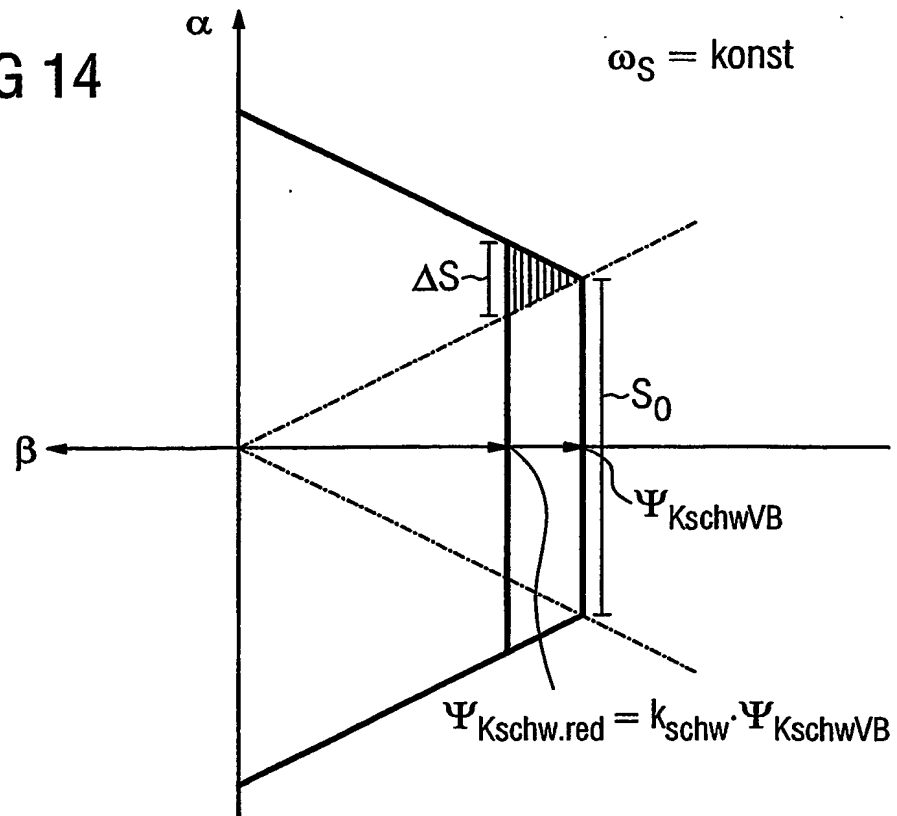
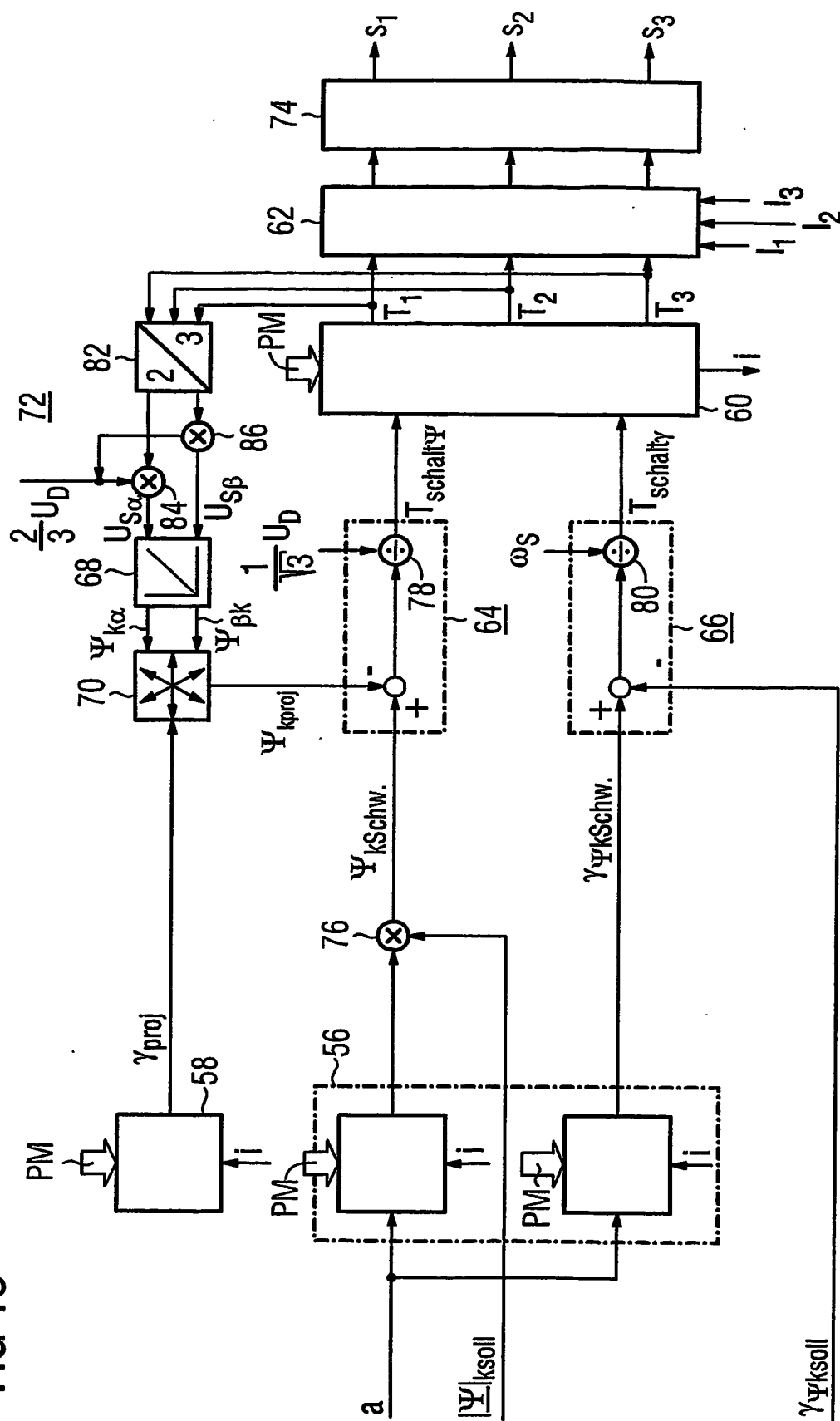


FIG 13



12/13

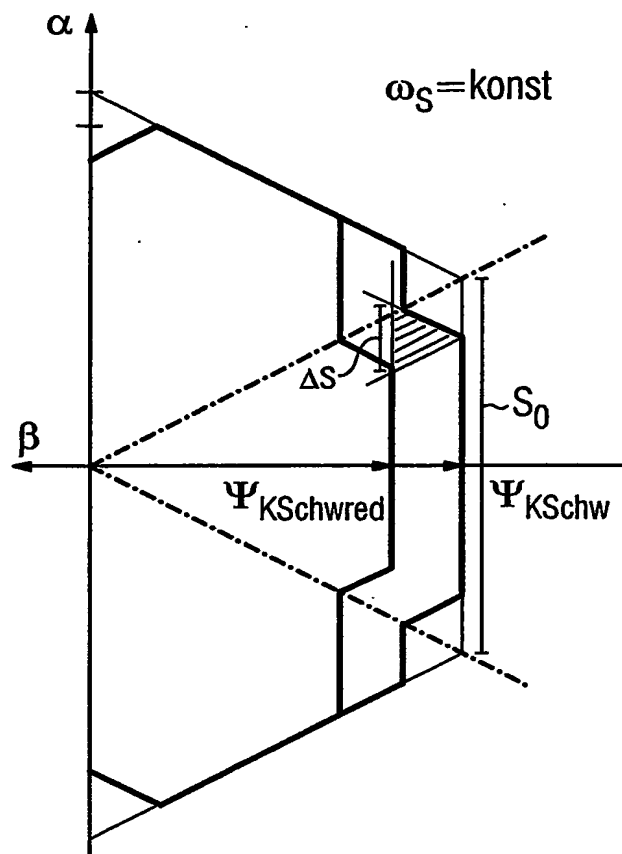
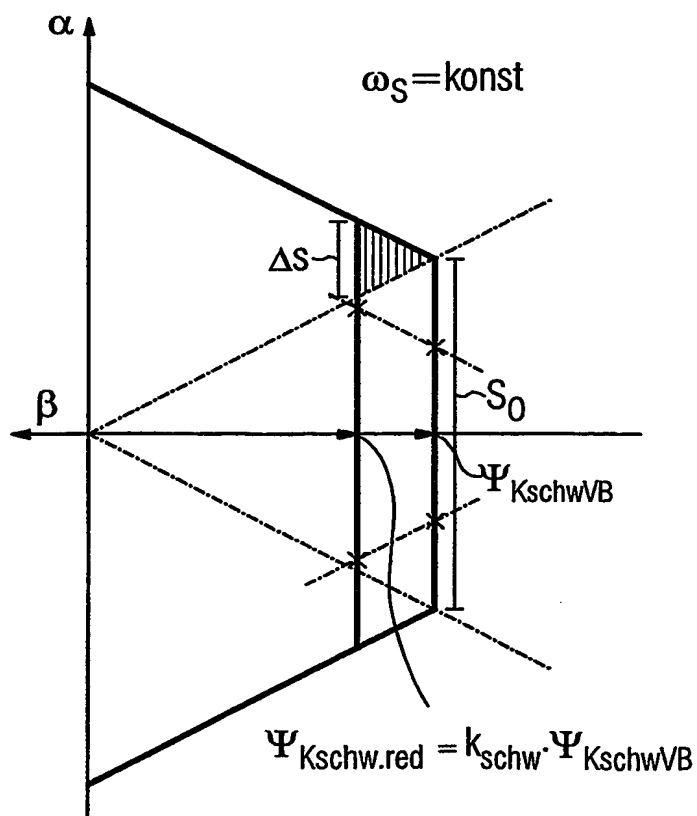


FIG 16



13/13

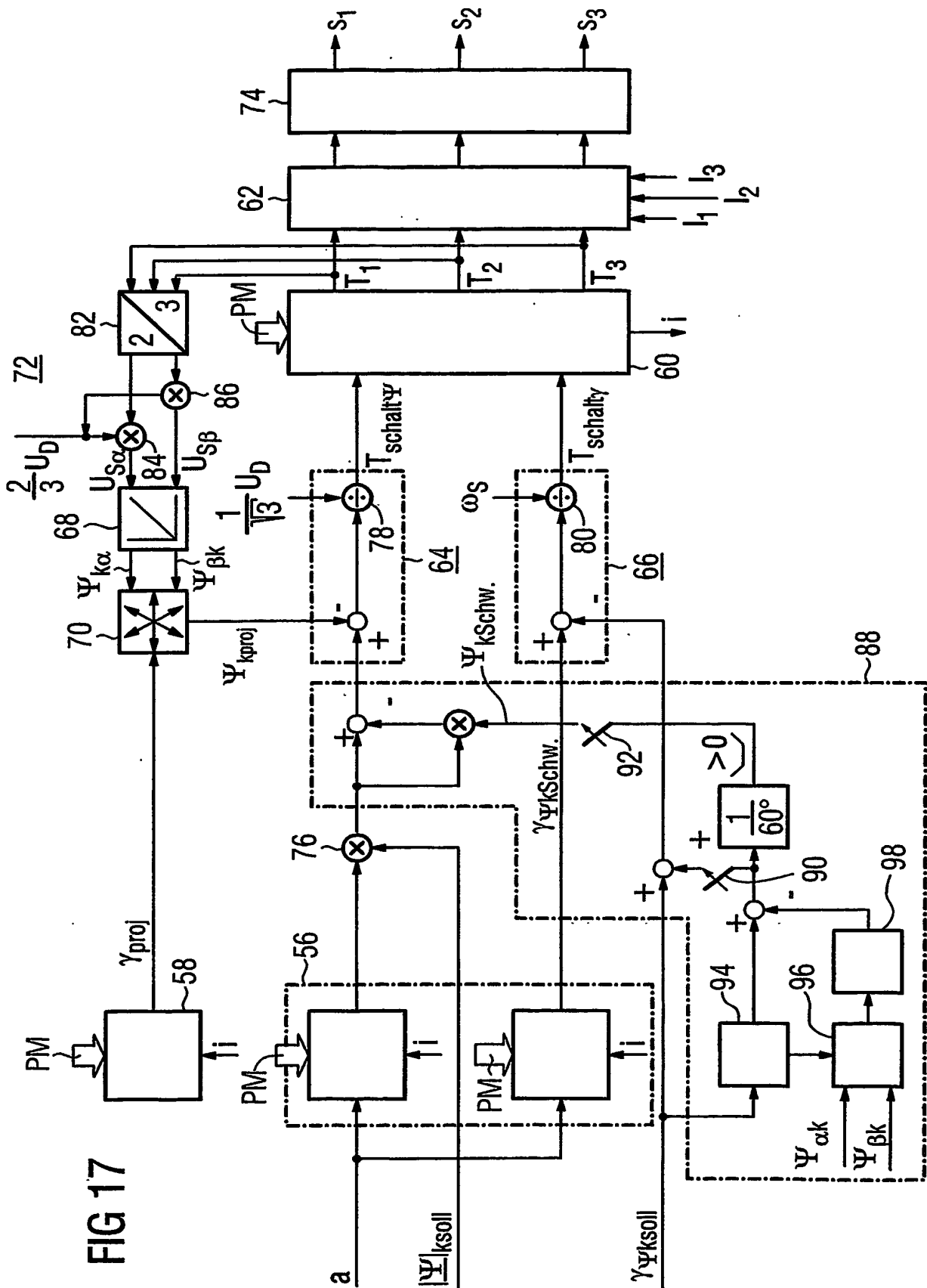


FIG 17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/007925

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H02P7/62 H02P21/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>HORSTMANN D ET AL: "DIE STROMRICHTERNAHE ANTRIEBSREGELUNG DES STEUERGERAETES FUER BAHNAUTOMATISIERUNGSSYSTEME SIBAS 32" ELEKTRISCHE BAHNEN, OLDENBOURG VERLAG. MUNCHEN, DE, vol. 90, no. 11, 1 November 1992 (1992-11-01), pages 344-350, XP000311285 ISSN: 0013-5437 cited in the application the whole document</p> <p style="text-align: center;">----- -/-</p>	1

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☐ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 November 2004

Date of mailing of the international search report

22/11/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Davis, A

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/007925

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>JAENECKE M ET AL: "DIREKTE SELBSTREGELUNG, EIN NEUARTIGES REGELVERFAHREN FUER TRAKTIONSANTRIEBE IM ERSTEINSATZ BEI DIESELELEKTRISCHEN LOKOMOTIVEN" ELEKTRISCHE BAHNEN, OLDENBOURG VERLAG. MUNCHEN, DE, vol. 89, no. 3, March 1991 (1991-03), pages 79-87, XP000200273 ISSN: 0013-5437 cited in the application the whole document</p>	1
X	<p>BAADER U ET AL: "DIRECT SELF CONTROL (DSC) OF INVERTER-FED INDUCTION MACHINE: A BASIS FOR SPEED CONTROL WITHOUT SPEED MEASUREMENT" 1 May 1992 (1992-05-01), IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE INC. NEW YORK, US, PAGE(S) 581-588 , XP000306107 ISSN: 0093-9994 the whole document</p>	1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/007925

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 H02P7/62 H02P21/00

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchiertes Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 H02P

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	HORSTMANN D ET AL: "DIE STROMRICHTERNAHE ANTRIEBSREGELUNG DES STEUERGERÄTES FÜR BAHNAUTOMATISIERUNGSSYSTEME SIBAS 32" ELEKTRISCHE BAHNEN, OLDENBOURG VERLAG. MÜNCHEN, DE, Bd. 90, Nr. 11, 1. November 1992 (1992-11-01), Seiten 344-350, XP000311285 ISSN: 0013-5437 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ----- -/-	1



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" Älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"Z" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

15. November 2004

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

22/11/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Davis, A

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/007925

C(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>JAENECKE M ET AL: "DIREKTE SELBSTREGELUNG, EIN NEUARTIGES REGELVERFAHREN FÜR TRAKTIONSANTRIEBE IM ERSTEINSATZ BEI DIESELELEKTRISCHEN LOKOMOTIVEN" ELEKTRISCHE BAHNEN, OLDENBOURG VERLAG. MÜNCHEN, DE, Bd. 89, Nr. 3, März 1991 (1991-03), Seiten 79-87, XP000200273 ISSN: 0013-5437 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument</p>	1
X	<p>BAADER U ET AL: "DIRECT SELF CONTROL (DSC) OF INVERTER-FED INDUCTION MACHINE: A BASIS FOR SPEED CONTROL WITHOUT SPEED MEASUREMENT" 1. Mai 1992 (1992-05-01), IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE INC. NEW YORK, US, PAGE(S) 581-588 , XP000306107 ISSN: 0093-9994 das ganze Dokument</p>	1